



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **CARACTERIZACIÓN, PRONÓSTICO Y ALTERNATIVAS DE MANEJO DE LAS HELADAS EN EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN LECHERO DEL VALLE DE UBATÉ Y CHIQUINQUIRÁ (COLOMBIA)**

**Douglas Andrés Gómez Latorre**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias  
Bogotá D.C., Colombia  
2014



# **CARACTERIZACIÓN, PRONÓSTICO Y ALTERNATIVAS DE MANEJO DE LAS HELADAS EN EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN LECHERO DEL VALLE DE UBATÉ Y CHIQUINQUIRÁ (COLOMBIA)**

**Douglas Andrés Gómez Latorre**

Tesis como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ciencias - Meteorología**

Director:

M Sc. José Francisco Boshell Villamarín

Línea de Investigación:

Agrometeorología

Grupo de Investigación en Meteorología

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias

Bogotá D.C., Colombia

2014





. .....A Liliana, Teresita, Dennise, Himelda,  
Ana, Patricia, Horacio, William, Douglas y  
Elizabeth.....



## **Agradecimientos**

A Dios y mi familia que son lo más importante y fueron la fuente de inspiración para concluir de manera satisfactoria éste trabajo.

Al profesor Francisco Boshell, por sus valiosos aportes en el desarrollo de cada una de las actividades.

A todos mis compañeros de CORPOICA, en especial la Dra. Elizabeth Aguilera y la Dra. Blanca Arce quienes me acompañaron y sugirieron varias metodologías utilizadas en éste trabajo.

A todos mis compañeros de la UNAL y a la profesora Gloria León a quien siempre agradeceré sus enseñanzas.

A Pedronel Jiménez, quien fue un puente de apoyo en las actividades de campo.

A todos quien decididamente estaban ahí para alcanzar éste logro



## Resumen

A fin de reducir la vulnerabilidad ante las heladas del sistema de producción lechero en el valle de Ubaté y Chiquinquirá se realizó una caracterización climática de la zona, relacionando estos eventos y las dos fases asociadas a los ciclos ENSO (El Niño y La Niña). Conjuntamente se determinó el grado de exposición territorial a heladas, a partir de algunas variables biofísicas, de modo que se identificaran las zonas de mayor susceptibilidad, y de la misma forma se caracterizó el sistema de producción lechero de la región, con el propósito de identificar los elementos más sensibles a las heladas, empleando modelos que permitieran estimar la pérdida de producción de leche (litros/vaca\*día), relacionada a la disponibilidad (Kg MS) y contenido nutricional del alimento (%).

Se utilizó la fórmula de Allen para la generación de un pronóstico local de heladas, con el objetivo de proponer el uso de herramientas técnicas para poner en marcha acciones de mitigación que eventualmente sean utilizadas por los ganaderos.

Con base en los resultados obtenidos de la caracterización climática y del sistema de producción, se realizó una revisión bibliográfica de las alternativas de manejo más adecuadas para la prevención y mitigación de las heladas en la región.

**Palabras clave:** caracterización, heladas, variabilidad climática, ENSO, modelación, sistema de producción lechero, alternativas de manejo de heladas.

## Abstract

In order to reduce the vulnerability of milk production system to the icy fronts hitting the Ubaté Valley and Chiquinquirá, a weather characterization was carried on, connecting the events and the two associated phases with ENSO cycles (El Niño y La Niña). The

document determined as well the level of local exposure to frosts, through the collection of some biophysical variables so the zones with a higher level of susceptibility can be identified, and in the same way the project characterizes milk production system of the region, with the purpose of identifying those elements that were the most sensitive to frosts using models that allows to estimate the milk production lost (l/vaca/día), related to disponibility (Kg/MS) and nutritional content of food (%).

Allen equation was used for local frost forecast generation; the objective of this project is to propose the use of technical tools for start up mitigation actions that could be eventually used by the stockbreeders.

Following the results obtained from weather and the production system characterization, an extensive literature review was done regarding wich of the proposed alternatives for the prevention and mitigation of local frost are the most suitable for the region.

**Keywords:** characterization, frost, climate variability, ENSO, modeling, dairy production system, frost management alternatives.

# Contenido

	Pág.
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Objetivos.....</b>	<b>11</b>
1.1    Objetivo general .....	11
1.2    Objetivos específicos .....	11
<b>2. Marco Teórico.....</b>	<b>13</b>
2.1    Análisis de riesgo .....	13
2.2    El clima y su variabilidad .....	15
2.2.1    Variabilidad climática intraestacional .....	16
2.2.2    Variabilidad climática estacional .....	17
2.2.3    Variabilidad climática interanual.....	18
2.2.4    Variabilidad climática interdecadal .....	21
2.2.5    Cambio climático .....	21
2.2.6    Efectos del clima en la agricultura.....	22
2.3    Eventos climáticos extremos .....	23
2.4    Heladas.....	23
2.4.1    ¿Qué es una helada? .....	23
2.4.2    Dinámica del daño por la helada.....	24
2.4.3    Clases de heladas .....	26
2.4.4    Proceso físico .....	28
2.4.5    Factores que determinan la ocurrencia de heladas.....	31
2.4.6    Las heladas en Colombia .....	35
2.5    Pronóstico y control de heladas.....	37
2.5.1    Predicción de las temperaturas mínimas .....	38
2.5.2    Generalidades sobre métodos activos y pasivos de control de heladas.....	38
2.5.1    Generalidades sobre el control de heladas en Colombia .....	41
<b>3. Materiales y métodos .....</b>	<b>43</b>
3.1    Zona de estudio .....	43
3.2    Información utilizada .....	44
3.2.1    Información climática .....	44
3.2.2    Índices oceánico - atmosféricos utilizados .....	45
3.2.3    Estación meteorológica de apoyo para el estudio. ....	46
3.2.4    Información geográfica .....	47
3.3    Análisis de exposición territorial a heladas .....	47
3.3.1    Elevación .....	49
3.3.2    Paisajes.....	49
3.3.3    Pendiente .....	50

3.3.4	Textura del suelo.....	51
3.3.5	Cobertura.....	52
3.3.6	Cercanía a cuerpos de agua.....	52
3.3.7	Determinación de las áreas de exposición a las heladas para el valle de Ubaté y Chiquinquirá.....	53
3.4	Análisis de variabilidad climática.....	55
3.4.1	Relación de las variables océano – atmosféricas con variables climáticas.....	55
3.4.2	Coeficiente de correlación de Pearson.....	55
3.4.3	Análisis compuesto.....	56
3.4.4	Interpolación espacial.....	58
3.5	Caracterización y pronóstico de heladas.....	59
3.5.1	Caracterización de heladas.....	59
3.5.2	Pronóstico de las heladas.....	60
3.6	Evaluación de sensibilidad del sistema de producción lechero a las heladas, a través de modelos de simulación.....	63
3.6.1	Caracterización del sistema de producción lechero.....	64
3.6.2	Modelación del sistema de producción.....	66
3.6.3	Datos de entrada para el modelo de simulación del sistema de producción lechero.....	69
3.6.4	Recolección de datos para la evaluación de la sensibilidad.....	70
3.6.5	Técnica de muestreo para la recolección de la información.....	71
3.7	Medidas de control y manejo en el sistema de producción lechero a las heladas.....	72
<b>4.</b>	<b>Resultados y discusión.....</b>	<b>73</b>
4.1	Caracterización climática de la zona.....	73
4.1.1	Precipitación.....	73
4.1.2	Temperatura.....	74
4.2	Análisis de variabilidad climática interanual en la zona.....	78
4.2.1	Determinación del grado de asociación lineal entre los ENSO y la precipitación.....	78
4.2.2	Análisis temporal del Índice Oceánico El Niño (ONI).....	79
4.2.3	Análisis de variabilidad climática interanual por variable climática.....	80
4.3	Zonificación de las áreas de mayor exposición a las heladas.....	91
4.3.1	Caracterización y calificación de las variables de tipo biofísico utilizadas en la determinación de las áreas de exposición a las heladas.....	91
4.3.2	Generación de las áreas de exposición a las heladas para el valle de Ubaté y Chiquinquirá.....	97
4.4	Caracterización y pronóstico de las heladas en el altiplano Cundiboyacense.....	100
4.4.1	Caracterización de las heladas.....	100
4.4.2	Pronóstico de las heladas.....	113
4.5	Evaluación de la sensibilidad del sistema de producción lechero a las heladas, a través de modelos de simulación.....	125
4.5.1	Caracterización del sistema de producción.....	125
4.5.2	Modelación de producción lechera a nivel estacional.....	128
4.5.3	Modelación de producción lechera ante la ocurrencia de heladas (Análisis de sensibilidad).....	135
4.6	Medidas de control y manejo en el sistema de producción lechera ante la ocurrencia de heladas.....	138
4.6.1	Control y previsión de la helada.....	138
4.6.2	Métodos de control recomendados.....	139



4.6.3 Alternativas de manejo de las heladas en el sistema de producción lechero 144

**5. Conclusiones y recomendaciones..... 147**

**Bibliografía ..... 161**



## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 2-1:</b> variación espacial del clima dado por los factores determinantes del clima (COMET Program, 2008) .....	15
<b>Figura 2-2:</b> Posiciones medias de la zona de Convergencia Intertropical ZCIT en los meses de enero y julio (Fuente: NOAA) .....	17
<b>Figura 2-3:</b> fase neutra (arriba), fase El Niño (a) y fase La Niña (b) en el pacifico ecuatorial. (Fuente: NOAA/NCEP/CPC) .....	19
<b>Figura 2-4:</b> regiones del Océano Pacífico Ecuatorial, que son vigiladas y monitoreadas en sus temperaturas y anomalías térmicas. La Región más importante y decisiva para Estudios e Investigaciones, es la denominada Niño 3.4. (arriba). Serie de tiempo del ONI (abajo). (Fuente: NOAA/NCEP/CPC) .....	20
<b>Figura 2-5:</b> helada provocada por corriente de aire frío (Tomado de: <a href="http://www.aeropuertosarg.com.ar/losforos/index.php?topic=14037.40">http://www.aeropuertosarg.com.ar/losforos/index.php?topic=14037.40</a> ).....	26
<b>Figura 2-6:</b> balance de radiación entre el suelo y la atmosfera (Snyder & de Melo-Abreu, 2010, pág. 48))......	29
<b>Figura 2-7:</b> inversión típica de las heladas (Fernandez Long & Barnatán, 2011). .....	31
<b>Figura 2-8:</b> desarrollo de una helada blanca (izquierda) y una helada negra (derecha). (Fernandez Long & Barnatán, 2011). .....	32
<b>Figura 2-9:</b> gradiente normal de temperatura e inversión térmica (Fernandez Long & Barnatán, 2011).....	33
<b>Figura 2-10:</b> áreas con riesgo a heladas según el IDEAM (Mayorga, González, & Hurtado, 2008). .....	37
<b>Figura 2-11:</b> protección de heladas a través del calentamiento de aire por medio de estufas y calderas. Tomado de: <a href="http://www.hydroenv.com.mx/">http://www.hydroenv.com.mx/</a> (Izquierda) y Centro Nacional de prevención de desastres de México (Derecha). .....	40
<b>Figura 2-12:</b> protección de heladas a través de la mezcla de las capas de aire por medio de ventiladores y helicópteros. Tomado de: <a href="http://www.hydroenv.com.mx/">http://www.hydroenv.com.mx/</a> .....	41
<b>Figura 2-13:</b> áreas con riesgo a heladas según el IDEAM (Mayorga, González, & Hurtado, 2008). .....	41
<b>Figura 3-1:</b> altiplano Cundiboyacense (Izquierdo); valle de Ubaté y Chiquinquirá (Derecho). En verde: sabana de Bogotá; en rojo: valle del Chicamocha. ....	44
<b>Figura 3-2:</b> emplazamiento de la estación Recuerdo Chiquinquirá .....	46
<b>Figura 3-3:</b> diagrama conceptual utilizado en el análisis de riesgo, adaptado para heladas (EIRD-ONU, 2004)......	47

<b>Figura 3-4:</b> diagrama conceptual de las variables biofísicas más importantes en la calificación del grado de exposición territorial a heladas. ....	48
<b>Figura 3-5:</b> esquema del enfriamiento radiativo nocturno. Fuente: Huamani (2005).....	50
<b>Figura 3-6:</b> jerarquía para la realización de la calificación de grado de exposición a las heladas .....	54
<b>Figura 3-7:</b> consideración de los terciles en una serie de datos. ....	57
<b>Figura 3-8:</b> aplicación creada por Snyder & Melo-Abreu (2010) llamada FFST (Frost Forecast), basada en el modelo de Allen (1957) para el pronóstico de heladas a escala local. ....	62
<b>Figura 3-9:</b> representación esquemática de los componentes y elementos de un sistema de producción animal. (León-Laverde, Arce, & Quiroz, 1997) .....	64
<b>Figura 3-10:</b> esquema del efecto de variables exógenas en el consumo de materia seca al pastoreo (León-Laverde, Arce, & Quiroz, 1997) .....	66
<b>Figura 3-11:</b> diagrama de partición de energía utilizado por el modelo de producción de leche (Aguilar González, Allende Vargas, & Morales Juregui, 2004).....	67
<b>Figura 4-1:</b> climatología periodo 1981 – 2010 de la precipitación en el altiplano Cundiboyacense (arriba: Diciembre-Enero-Febrero DEF y Marzo-Abril-Mayo MAM; abajo: Junio-Julio-Agosto JJA y Septiembre-Octubre-Noviembre SON) .....	74
<b>Figura 4-2:</b> climatología periodo 1981 – 2010 de la temperatura media en el altiplano Cundiboyacense (arriba: Diciembre – Enero - Febrero DEF y Marzo – Abril - Mayo MAM; abajo: Junio – Julio - Agosto JJA y Septiembre – Octubre - Noviembre SON). ....	75
<b>Figura 4-3:</b> climatología periodo 1981 – 2010 de la temperatura mínima media en el altiplano Cundiboyacense (arriba: Diciembre – Enero - Febrero DEF y Marzo – Abril - Mayo MAM; abajo: Junio – Julio - Agosto JJA y Septiembre – Octubre - Noviembre SON). ....	76
<b>Figura 4-4:</b> climatología periodo 1981 – 2010 de la temperatura máxima media en el altiplano Cundiboyacense (arriba: Diciembre – Enero - Febrero DEF y Marzo – Abril - Mayo MAM; abajo: Junio – Julio - Agosto JJA y Septiembre – Octubre - Noviembre SON). ....	77
<b>Figura 4-5:</b> Mapas de correlaciones lineales entre la precipitación acumulada mensual y el índice ONI y la TSM para la regiones 1+2, 3 y 3.4. ....	78
<b>Figura 4-6:</b> línea de tiempo de los eventos El Niño/La Niña para el periodo 1950 – 2012 .....	79
<b>Figura 4-7:</b> gráfica de contingencia de la estación Apto El Dorado, estableciendo la relación entre el índice oceánico El Niño (ONI) y la precipitación.....	82
<b>Figura 4-8:</b> alteración más probable de la precipitación bajo la influencia de El Niño .....	83
<b>Figura 4-9:</b> alteración más probable de la temperatura media bajo la influencia de El Niño .....	84
<b>Figura 4-10:</b> alteración más probable de la temperatura máxima bajo la influencia de El Niño .....	85
<b>Figura 4-11:</b> alteración más probable de la temperatura mínima bajo la influencia de El Niño .....	86
<b>Figura 4-12:</b> alteración más probable de la precipitación bajo la influencia de La Niña ..	87

<b>Figura 4-13:</b> alteración más probable de la temperatura media bajo la influencia de La Niña.....	88
<b>Figura 4-14:</b> alteración más probable de la temperatura máxima bajo la influencia de La Niña.....	89
<b>Figura 4-15:</b> alteración más probable de la temperatura mínima bajo la influencia de La Niña.....	90
<b>Figura 4-16:</b> mapa de elevación y calificación de la exposición con respecto a la elevación en el valle de Ubaté y Chiquinquirá. ....	92
<b>Figura 4-17:</b> mapa de paisaje fisiográfico y calificación de la exposición con respecto al paisaje en el valle de Ubaté y Chiquinquirá. ....	93
<b>Figura 4-18:</b> mapa de pendientes y calificación de la exposición con respecto a la pendiente en el valle de Ubaté y Chiquinquirá.....	94
<b>Figura 4-19:</b> mapa de textura de los suelos y calificación de la exposición con respecto a la textura en el valle de Ubaté y Chiquinquirá.....	95
<b>Figura 4-20:</b> mapa de cobertura y uso del suelo y calificación de la exposición con respecto a dicha variable en el valle de Ubaté y Chiquinquirá. ....	96
<b>Figura 4-21:</b> mapa de cercanía a cuerpos de agua y calificación de la exposición con respecto a dicha variable en el valle de Ubaté y Chiquinquirá. ....	97
<b>Figura 4-22:</b> mapa de áreas de exposición a las heladas a partir de variables biofísicas, para el Valle de Ubaté y Chiquinquirá .....	98
<b>Figura 4-23:</b> ventanas de trabajo en el altiplano Cundiboyacense, donde se observan las estaciones utilizadas para el cálculo de la frecuencia relativa de las heladas.....	101
<b>Figura 4-24:</b> gráfico de frecuencia relativa de la estación Granja Tunguavita en el municipio de Paipa (Boyacá), mostrando la probabilidad de ocurrencias de heladas entre ligeras y moderadas a nivel decadal.....	102
<b>Figura 4-25:</b> gráficos de frecuencia relativa de las heladas entre ligeras y moderadas a lo largo del altiplano Cundiboyacense. Arriba se observan estaciones pertenecientes al valle de Ubaté y Chiquinquirá y valle del Chicamocha; abajo se observan las estaciones pertenecientes a la sabana de Bogotá .....	103
<b>Figura 4-26:</b> gráficos de frecuencia relativa de las heladas severas a lo largo del altiplano Cundiboyacense. Arriba se observan estaciones pertenecientes al valle de Ubaté y Chiquinquirá y valle del Chicamocha; abajo se observan las estaciones pertenecientes a la sabana de Bogotá .....	105
<b>Figura 4-27:</b> mapa de temperatura mínima media absoluta anual (arriba) y de dispersión de las series de tiempo (abajo) deducido a partir del cálculo de la desviación estándar en el altiplano Cundiboyacense.....	107
<b>Figura 4-28:</b> distribución espacial de los periodos de retorno de la temperatura mínima absoluta anual, a nivel del altiplano Cundiboyacense. Los periodos de retorno considerados fueron 2, 5, 7, 10 y 20 años. ....	108
<b>Figura 4-29:</b> evolución de la temperatura mínima para la descripción de la helada severa ocurrida el día 04 de febrero de 2012.....	111
<b>Figura 4-30:</b> histograma de frecuencia horarias de heladas (incluyendo enfriamientos), en cuatro estaciones de la red automática en el altiplano Cundiboyacense .....	112

<b>Figura 4-31:</b> predicción climática de la temperatura mínima en Colombia, para el mes de mayo (Izquierda) y trimestre mayo, junio y julio (derecha) de 2013, hecho a través de análisis de correlación canónica. Fuente: IDEAM (2013) <a href="http://institucional.ideam.gov.co/jsp/1696">http://institucional.ideam.gov.co/jsp/1696</a> [Consultado: Mayo de 2013].....	114
<b>Figura 4-32:</b> relación entre los eventos ENSO y el número de heladas por trimestre ...	117
<b>Figura 4-33:</b> precipitación (arriba), temperatura mínima-máxima (medio) y humedad relativa mínima-máxima (abajo) de la estación Recuerdo-Chiquinquirá. Periodo: 28/Diciembre/2012 – 22/Marzo/2013. ....	119
<b>Figura 4-34:</b> resultados del pronóstico del modelo FFST sin tener y teniendo en cuenta la temperatura del punto de rocío Td de las 22Hs con respecto a las observaciones. ....	123
<b>Figura 4-35:</b> gráfico de dispersión entre la observación y el pronóstico. A la derecha se utilizó la Td (22 Hs.), mientras a la izquierda sólo T. ....	123
<b>Figura 4-36:</b> datos generales de las fincas a las cuales se les aplicó la entrevista.....	126
<b>Figura 4-37:</b> curva de lactancia para bovinos de dos o más partos para el valle de Ubaté y Chiquinquirá. ....	131
<b>Figura 4-38:</b> producción promedio mensual y agregada mensual de leche por vaca (litro por vaca) simulado para un periodo de rotación de pradera de la especie kikuyo de 45 a 60 días, para un periodo de lactancia de 300 días iniciado en Enero.....	132
<b>Figura 4-39:</b> producción promedio mensual y agregada mensual de leche por vaca (litro por vaca) simulado para un periodo de rotación de pradera de la especie kikuyo de 45 a 60 días, para un periodo de lactancia de 300 días iniciado en Octubre.....	134
<b>Figura 4-40:</b> resultados de la modelación de la producción diaria de leche para el mes de enero de 2013.....	136
<b>Figura 4-41:</b> superficies de respuesta obtenidas a partir del uso del modelo Aguilar <i>et al</i> (2004) combinando las variables: temperatura mínima (°C) y energía metabolizable (Mcal/Kg*MS) (disponibilidad de forraje), para obtener .....	137
<b>Figura 4-42:</b> caudal de riego para aspersores convencionales sobre la cobertura vegetal para la protección contra las heladas (Snyder & de Melo-Abreu, 2010). ....	142
<b>Figura 4-43:</b> Cambios en la temperatura del borde de la hoja cuando es humedecido por un sistema de aspersión. Tomado de Wheaton y Kidder, 1964, nombrado por (Snyder & de Melo-Abreu, 2010). ....	143

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 3-1:</b> calificación de la susceptibilidad a heladas por variable .....	49
<b>Tabla 3-2:</b> calificación de la susceptibilidad a heladas por variable determinando nichos espaciales .....	54
<b>Tabla 3-3:</b> datos de entrada al modelo de producción de leche .....	69
<b>Tabla 3-4:</b> fincas a las cuales se realizó el muestreo (entrevista).....	70
<b>Tabla 4-1:</b> clasificación de las heladas propuesta por rangos de temperatura .....	101
<b>Tabla 4-2:</b> clasificación de la amenaza ante la ocurrencia en el número de heladas.....	115
<b>Tabla 4-3:</b> correlación de las variables climáticas monitoreadas en la estación Recuerdo-Chiquinquirá. ....	120
<b>Tabla 4-4:</b> resultados del modelo FFST, obtenidos del proceso de calibración. Tn: Temperatura mínima observada; Tp'(°C) Temperatura de la predicción, sin tener en cuenta la temperatura del punto de rocío dos horas después de la puesta del sol (Td); Tp(°C) temperatura mínima predicha teniendo en cuenta la temperatura del punto de rocío dos horas después de la puesta del sol (Td). ....	122
<b>Tabla 4-5:</b> resultados de las medidas de evaluación del pronóstico de la temperatura mínima en noches de helada para la estación Recuerdo-Chiquinquirá .....	124
<b>Tabla 4-6:</b> características generales de las fincas en las cuales se aplicaron las entrevistas.....	126
<b>Tabla 4-7:</b> descripción del componente animal para el valle de Ubaté y Chiquinquirá...	127
<b>Tabla 4-8:</b> descripción del componente de alimentación para el valle de Ubaté y Chiquinquirá .....	128
<b>Tabla 4-9:</b> datos de entrada al modelo del sistema de producción de leche (Aguilar González, Allende Vargas, & Morales Juregui, 2004).....	129
<b>Tabla 4-10:</b> producción de leche para un periodo de lactancia de 300 días, iniciando en el mes de enero. ....	133
<b>Tabla 4-11:</b> producción de leche para un periodo de lactancia de 300 días, iniciando en el mes de octubre.....	134
<b>Tabla 4-12:</b> métodos de control y previsión de heladas utilizados por los ganaderos....	139
<b>Tabla 4-13:</b> caudales de aspersión recomendados para la protección de cultivos de bajo crecimiento (Snyder & de Melo-Abreu, 2010) .....	142
<b>Tabla 4-14:</b> métodos de control y previsión de heladas utilizados por los ganaderos....	145





# Introducción

El clima, entendido como las condiciones atmosféricas predominantes en una región (Pabón , 2011), por primera vez en siglos muestra una alteración de los ciclos lluviosos - secos y cálidos – fríos, probablemente por causa de las actividades del hombre, debido en parte, por la cantidad descontrolada de gases contaminantes emitidos a la atmosfera, con la propiedad de retener la radiación que emite la tierra, modificando el balance de radiación terrestre (Boshell J. F., 2008).

Las fluctuaciones del clima generan incertidumbre en todos en los sectores económicos de la sociedad (energético, agrícola, servicios, entre otros), sobre todo en el agropecuario, ya que en épocas cuando se presentan anomalías climáticas severas como sequías, heladas o excesos de lluvias, éstas intensifican su efecto y afectan de manera fuerte cultivos transitorios y/o permanentes, pasturas y zonas de pastoreo de animales, generando pérdidas económicas de gran magnitud, por lo que para estos problemas se deben buscar mejores soluciones, que permitan mitigar sus efectos y/o adaptarse a las condiciones que impactan los procesos productivos.

En Colombia, las fluctuaciones climáticas han afectado de manera fuerte, el desarrollo de las actividades agrícolas. En los últimos años distintas regiones naturales del país han ido presentado mayor vulnerabilidad ante los efectos causados por eventos climáticos extremos tales como periodos de sequía intensos en los periodos 1991-1992 y 2006-2007, y de excesos de lluvia en 1999-2000 y 2010-2011 como casos relevantes. En el caso del altiplano Cundiboyacense, donde se localiza el valle de Ubaté y Chiquinquirá, los sistemas agropecuarios han venido presentando una alta vulnerabilidad a las amenazas asociadas a la variabilidad climática intra e interanual y sus eventos climáticos extremos tales como inundaciones-encharcamientos y en menor medida heladas y sequías, generando pérdidas económicas y problemas ambientales de amplio impacto (Corpoica, 2012).

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos de tiempo relativamente cortos; durante un año en particular se registran valores por encima o por debajo del promedio normal (normal climatológica) (Montealegre J. E., 2009). Los valores por encima o por debajo de la normal climatológica no son más que promedios aritméticos de series de tiempo relativamente largas, mínimo 30 años (OMM, 1984), con los cuales se pueden determinar las anomalías (diferencia entre el valor observado y el promedio), cuyo resultado permite calificar, puesto que no es la calificación como tal, sino un orden de menor a mayor (viceversa) de las anomalías anuales.

Los daños asociados a los eventos climáticos extremos, como son los excesos de lluvia y las heladas, tuvieron efectos negativos en las actividades agro-productivas de algunas zonas del territorio colombiano. Para el caso de los excesos de lluvias, en el periodo 2010 - 2011, se presentaron precipitaciones muy por encima de la normal climatológica, causando inundaciones y anegamientos severos, razón por la cual en el altiplano Cundiboyacense disminuyó de manera sustancial el rendimiento de cultivos como la papa y el maíz y la producción de derivados lácteos; sólo en el valle de Ubaté y Chiquinquirá, cuyo primer renglón de la economía regional es la ganadería, las inundaciones en las áreas de pastoreo derivaron en la baja disponibilidad de forrajes, alimento fundamental de los bovinos (Corpoica, 2012).

De la misma forma, en el periodo 2006-2007 (diciembre, enero y febrero), las bajas temperaturas de las madrugadas, que provocaron heladas en el altiplano Cundiboyacense (tema de análisis de esta investigación), afectaron 150.000 ha de pastos, disparando los costos de producción de los ganaderos (Caracol Radio, 2007), ya que una helada, afecta la actividad funcional de las plantas, y según su intensidad (tiempo que dura la temperatura por debajo del umbral de daño), provoca su muerte; sin embargo, en esta zona es muy común la ocurrencia de estos fenómenos especialmente en los meses de diciembre, enero y febrero, siendo esta región una de las más susceptibles a la presencia de estos eventos extremos, con una probabilidad cercana al 90% de que el evento ocurra (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).

Al igual que en el 2007, en el 2011 la asociación de productores de leche (ANALAC) estimó que los estragos por el fenómeno de El Niño acaecido a finales de 2009 y primer semestre de 2010 afectó considerablemente miles de hectáreas de pastos (aproximadamente las mismas 150.000 ha del 2007), en las regiones lecheras del altiplano Cundiboyacense, las cuales no recuperaron su nivel óptimo de producción, debido a las inundaciones y anegamientos ocurridos un año después bajo los efectos del evento La Niña (ANALAC, 2012).

Según estadísticas de ANALAC (2011), la producción de leche se redujo aproximadamente en 20 millones de litros producidos en Cundinamarca y Boyacá (región 1), pasando de 82.5 millones de litros en diciembre de 2009, cuando no habían descensos fuertes de temperatura que afectara los pastos, a 63.5 millones de litros en febrero de 2010, mes donde se presentaron las heladas de mayor intensidad.

Uno de los factores que condicionan la ocurrencia de heladas, así como su severidad, es cuando a nivel territorial actúa más de un ciclo de variabilidad climática. Además del movimiento estacional de la ZCIT, que determina las temporadas secas y lluviosas, los eventos ENSO (fases El Niño y La Niña) inciden de forma directa en la climatología de la zona, creando condiciones óptimas para inhibir o favorecer la ocurrencia de heladas.

Es por ello que el fin de la investigación es caracterizar en el valle de Ubaté y Chiquinquirá el comportamiento espacial y temporal de las heladas y cómo éstas afectan al sistema de producción lechero, cuyo componente principal son los pastos, esto con el objetivo principal de reducir la vulnerabilidad del sistema a las heladas. Para cumplir este objetivo se emplearon herramientas de modelación que ayudaron a determinar el grado de sensibilidad del sistema de producción, cuyos resultados permitieron establecer los tipos de alternativas tecnológicas recomendables para que los ganaderos implementen en sus hatos.



# **1.Objetivos**

## **1.1 Objetivo general**

Contribuir a reducir la vulnerabilidad del sector lechero del Valle de Ubaté y Chiquinquirá a través de la identificación, caracterización, zonificación y pronóstico de las heladas como base para orientar las medidas tecnológicas de prevención y manejo.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar el comportamiento de las variables climáticas predeterminantes de las heladas en la zona de estudio (temperatura, precipitación, humedad relativa y brillo solar) y la influencia de la “Oscilación ENSO” en la incidencia de éste fenómeno en el valle de Ubaté y Chiquinquirá.
- Identificar las áreas más vulnerables a las heladas y caracterizar las variables biofísicas asociadas
- Evaluar algunos modelos estadísticos y de redes neuronales para el pronóstico de heladas en la zona de estudio.
- Establecer los elementos del sistema de producción vulnerables a las heladas y las medidas de adaptación y prevención utilizadas por los productores



## **2.Marco Teórico**

### **2.1 Análisis de riesgo**

El riesgo es inherente a las diferentes actividades de la cotidianidad, por ello a partir del conocimiento del riesgo, se puede llegar al planteamiento de actividades conducentes a la minimización de las amenazas que pueden ser objeto. Según Soldano (2009) el riesgo es una abstracción de origen netamente humano cuyo concepto se encuentra asociado a la idea del porvenir sin certeza presente en la sociedad, por ello el curso de los acontecimientos de discreto pronóstico, produce consecuencias no deseadas sobre el espacio físico alterando el territorio.

Dentro de las definiciones de riesgo, las cuales son muchas, algunas simples y otras estructuradas, pueden destacarse las siguientes:

- Probabilidad de que ocurra un hecho indeseable (Soldano, 2009)
- Combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Los factores que lo componen son la amenaza y la vulnerabilidad. (UNISDR, 2009)
- Probabilidad de que, durante un período específico de tiempo, se produzcan alteraciones graves del funcionamiento normal de una comunidad o una sociedad debido a los fenómenos físicos peligrosos que interactúan con condiciones sociales vulnerables, dando lugar a efectos humanos, materiales, económicos o ambientales adversos generalizados que requieren una respuesta inmediata a la emergencia para satisfacer las necesidades humanas esenciales, y que pueden requerir apoyo externo para la recuperación (IPCC, 2012).

La percepción del riesgo varía según la sensibilidad de cada persona, comunidad o gobierno. Tener conocimiento de las amenazas y de la vulnerabilidad, así como el disponer de información precisa y oportuna al respecto puede influir en esta percepción (EIRD-ONU, 2004).

Dado que la amenaza y la vulnerabilidad por separado no representa factores de peligro, pero si se juntan se convierten en un riesgo (Soldano, 2009), dicho termino es formulado a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Riesgo} = f(\text{Amenaza}, \text{Vulnerabilidad}) \quad (2.1)$$

La amenaza es un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales. La amenaza se determina en función de la intensidad y la frecuencia (UNISDR, 2009).

La vulnerabilidad se puede considerar como el grado de susceptibilidad de los elementos expuestos (EIRD-ONU, 2004), definida también como las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza (UNISDR, 2009)

La ocurrencia de un valor de una variable climática por encima (o por debajo) de un valor de umbral cercano al extremo superior (o inferior) de la horquilla de valores observados de la variable. En aras de la simplicidad, tanto los fenómenos meteorológicos extremos como los fenómenos climáticos extremos a los que se hace referencia en el presente informe se denominarán “fenómenos climáticos extremos”.

Ahora bien, la vulnerabilidad se encuentra dividida en los siguientes factores:

$$\text{Vulnerabilidad} = \frac{\text{Exposición} * \text{Susceptibilidad}}{\text{Resiliencia}} \quad (2.2)$$



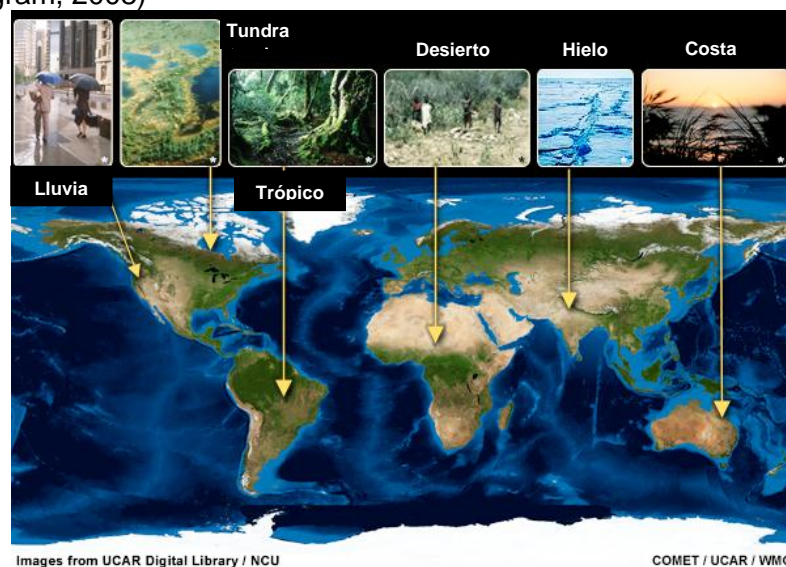
La exposición se refiere a la condición de desventaja de debido a la ubicación posición o localización de un sujeto, objeto o sistema expuesto al riesgo (Ycaza & Manobanda, 2009), en otras palabras lo que potencialmente es afectable.

La susceptibilidad es el grado de fragilidad interna de un sujeto, objeto o sistema para enfrentar una amenaza y recibir un posible impacto debido a la ocurrencia de un evento adverso y la resiliencia (entendida como la capacidad adaptativa) es la disposición de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas (Ycaza & Manobanda, 2009).

## 2.2 El clima y su variabilidad

El clima se puede entender como la condición ambiental media de la atmosfera en un lugar, una región o el planeta entero en un tiempo determinado (Montealegre J. E., 2009). El clima es influenciado por factores determinantes (fisiográficos) tales como la latitud, elevación y distancia al mar y por factores radiativos relacionados con el balance de energía de la tierra (equilibrio radiativo). En la Figura 2-1 se aprecia un ejemplo de diversidad climática en la tierra.

**Figura 2-1:** variación espacial del clima dado por los factores determinantes del clima (COMET Program, 2008)



La radiación solar es el combustible que pone en movimiento la máquina atmosférica y junto con el efecto invernadero son denominados factores forzantes del clima (Montealegre J. E., 1999), los cuales se consideran como los de mayor trascendencia.

El clima presenta variaciones en tiempo y espacio, haciendo dinámico su comportamiento, por lo que puede definirse que la variabilidad climática es aquella fluctuación del clima en diversas escalas de tiempo relativamente de corta duración. Los principales factores para que exista una variación del clima a través del tiempo son: variación de los parámetros orbitales de la Tierra (excentricidad, precesión, inclinación), posibles cambios en la órbita del Sol alrededor del centro de la galaxia, alteración de los factores radiativos forzantes, variación de largo plazo en la actividad solar, dinámica de las placas tectónicas (movimientos de la corteza terrestre, cambios en la distribución de los continentes), dinámica orbital del sistema Tierra-Luna, impacto de meteoritos de grandes dimensiones y las erupciones volcánicas. (Montealegre J. E., 2012).

La variabilidad climática se encuentra clasificada en “escalas”, lo que permite hacer una diferenciación de los periodos de semanas, meses, años, décadas. A continuación se describen las escalas de variabilidad más importantes a nivel climatológico

### **2.2.1 Variabilidad climática intraestacional**

Este tipo de variabilidad obedece a fluctuaciones climáticas correspondientes a periodos de semanas. La mayoría de veces estas fluctuaciones pasan desapercibidas porque su amplitud es pequeña, en comparación con las del ciclo anual (Montealegre J. E., 2012). En Colombia se asocia a una ondulación en el campo de la presión atmosférica, modificando los patrones de convección y precipitación en el pacifico ecuatorial oriental y como consecuencia genera variaciones en gran parte del territorio suramericano (Naumann *et al.* 2007).

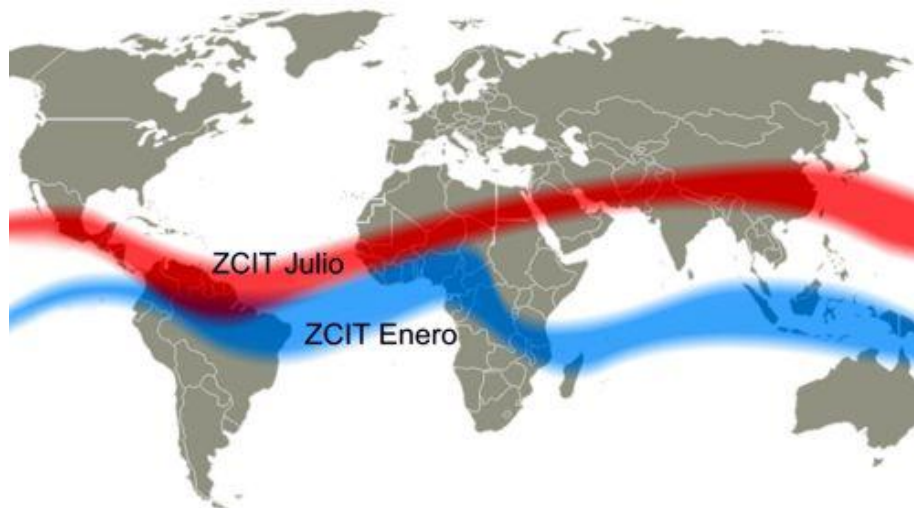
La Oscilación Madden-Julian (OMJ), ejemplo de dicha variabilidad, es una perturbación tropical que se propaga hacia el este en las zonas tropicales de todo el mundo con un ciclo en el orden de los 30 a 60 días. La OMJ tiene un gran impacto en los patrones de las precipitaciones, en la circulación atmosférica y en la temperatura de la superficie de casi la totalidad de las zonas tropicales y subtropicales del mundo. (Madden, 2009).

### 2.2.2 Variabilidad climática estacional

A este tipo de variación obedecen las oscilaciones de tipo mensual, determinando así la variación anual de los elementos climáticos. En latitudes medias, la secuencia de las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño es algo común para los habitantes de dichas regiones, en tanto que en latitudes tropicales, lo frecuente es la alternancia de temporadas lluviosas y temporadas secas (Montealegre J. E., 2009).

La alternancia de temporadas lluviosas y secas, rige las actividades económicas de la población, siendo importante en las actividades agrícolas, por lo que los agricultores planean los ciclos de cultivo de acuerdo a la llegada de las lluvias. El modulador más importante de las lluvias en Colombia a escala estacional es la llamada Zona de Convergencia intertropical (ZCIT), la cual migra latitudinalmente de norte a sur.

**Figura 2-2:** Posiciones medias de la zona de Convergencia Intertropical ZCIT en los meses de enero y julio (Fuente: NOAA)



La ZCIT consiste en un cinturón nuboso (de baja presión), que se forma por una convergencia de masas de aire húmedas y cálidas, que provocan un desarrollo de la actividad convectiva (formadora de nubes), trayendo consigo lluvias de diferente intensidad a lo largo del territorio nacional. Se puede afirmar que la ZCIT es la responsable de las dos temporadas de lluvia en gran parte del país. Mientras que en parte de la región andina se presentan condiciones secas en ciertos períodos, en la región caribe o amazónica se pueden presentar periodos lluviosos en esos períodos (Figura 2-2) (IDEAM, 2002).

### 2.2.3 Variabilidad climática interanual

A esta escala corresponden las variaciones que se presentan en las variables climatológicas de año en año. Normalmente percibimos que la precipitación de la estación lluviosa en un determinado lugar, no siempre es la misma de un año a otro, sino que fluctúa por encima o por debajo de lo normal. La variabilidad climática, enmarcada dentro de esta escala, podría estar relacionada con alteraciones en el balance global de radiación. Un ejemplo típico de la variabilidad climática interanual corresponde a los fenómenos enmarcados dentro del ciclo El Niño/La Niña - Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) (Montealegre J. E., 2012), el cual es la causa de la mayor señal de variabilidad climática en la franja tropical del océano Pacífico, en la escala interanual (IDEAM, 2002).

El ciclo Niño, Niña - Oscilación del Sur – ENSO, es un sistema de interacciones entre el **océano** Pacífico ecuatorial y la **atmósfera**, el cual fluctúa de un año a otro (IRI, 2012).

El Niño y su fase opuesta La Niña, son componentes **oceánicas** del ENSO y corresponden, en términos generales, a la aparición, de tiempo en tiempo, de aguas superficiales relativamente más cálidas (El Niño) o más frías (La Niña) que lo normal en el Pacífico tropical central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia, siendo una de las formas principales de observar el sistema ENSO. Estas alteraciones de la estructura térmica superficial y subsuperficial del océano están asociadas con el debilitamiento de los vientos alisios del Este y con el desplazamiento del núcleo de convección profunda del oeste al centro del Océano Pacífico tropical, en condiciones El Niño o con su permanencia e intensificación en el caso de La Niña (IDEAM, 2002).

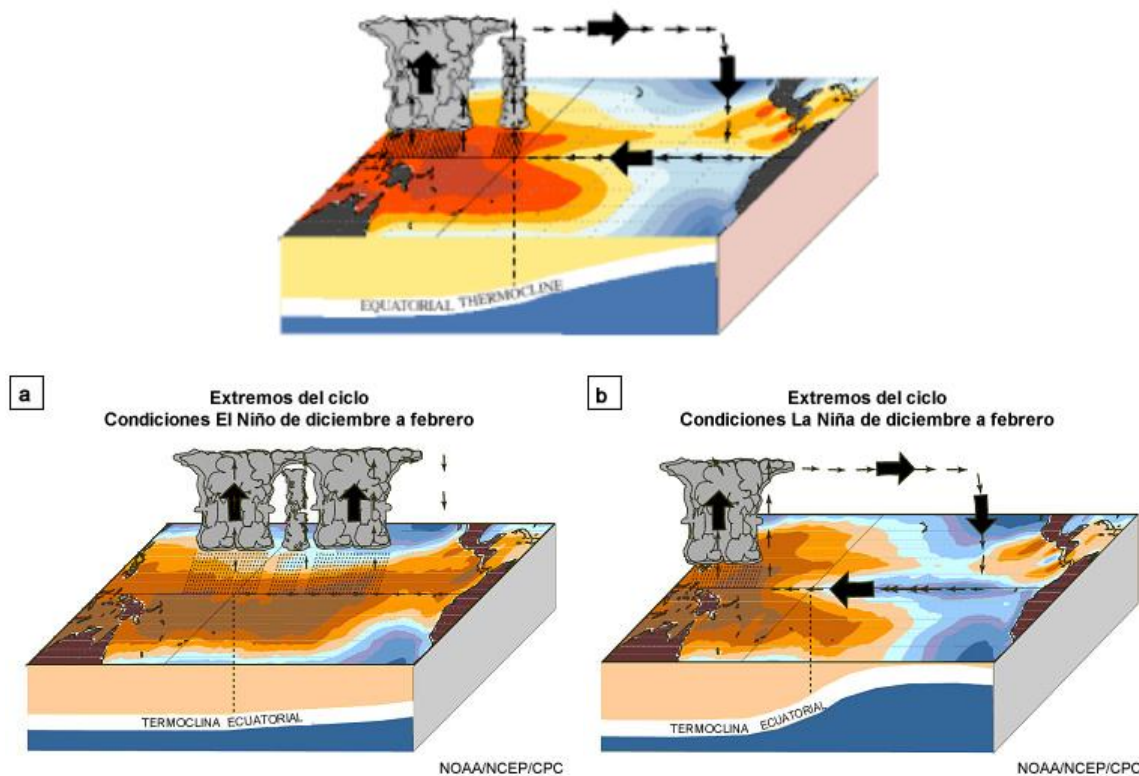
La componente **atmosférica** del ENSO, conocida con el nombre de la Oscilación del Sur, corresponde a la variación interanual del campo de presión atmosférica cerca de la superficie, en la región del Pacífico centro – occidental. Durante algunos años la presión atmosférica en el Pacífico central es mayor que en el occidental, en otros años ocurre lo contrario; esta alternancia interanual de las anomalías positivas y negativas de la presión atmosférica ha sido comprobada mediante la correlación inversa y bien definida entre los

valores de presión atmosférica en Tahití (isla localizada en el centro del Pacífico) y Darwin (nororiente de Australia). (IDEAM, 2002).

En la Figura 2-3 se observa el comportamiento de la fase fría, cálida y neutral de los ciclos ENSO.

Durante la fase neutra, el agua más caliente se encuentra en el Pacífico occidental, al igual que la mayor precipitación. Los vientos cerca de la superficie del océano viajan de este a oeste a través del Pacífico (es decir, vientos del Este) (IRI, 2012).

**Figura 2-3:** fase neutra (arriba), fase El Niño (a) y fase La Niña (b) en el pacifico ecuatorial. (Fuente: NOAA/NCEP/CPC)

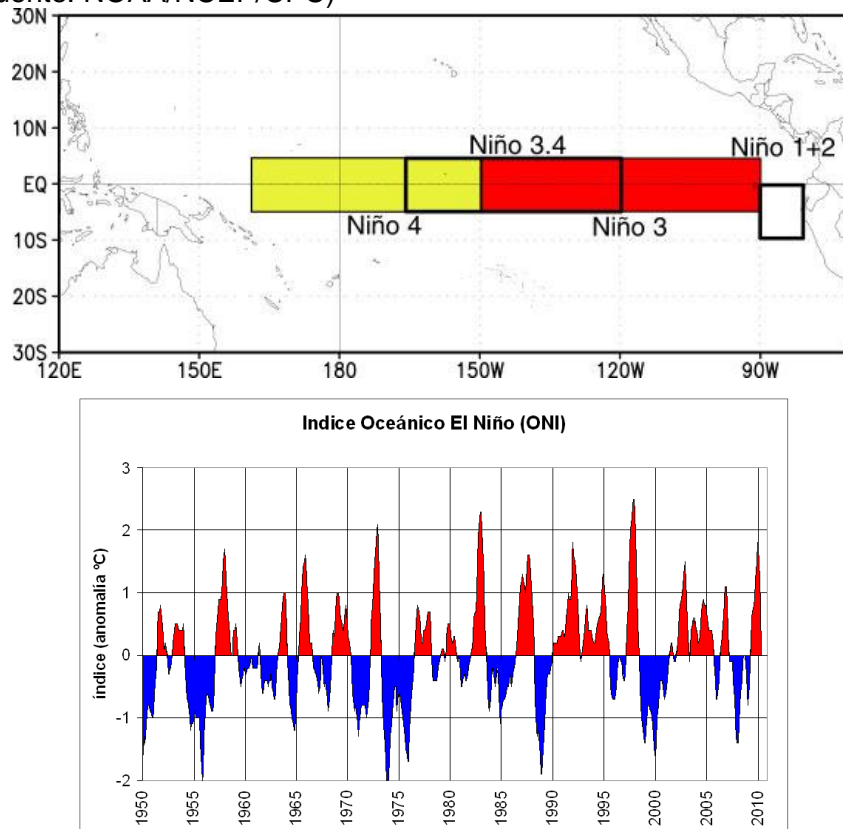


En la fase El Niño, los vientos del Este se debilitan, las temperaturas superficiales del mar son más cálidas que el promedio del Pacífico ecuatorial central y oriental, desplazando la zona de lluvias fuertes hacia el Este (Figura 2-3 a). Lo contrario ocurre cuando existen condiciones La Niña. Durante estos eventos, los vientos del este se fortalecen, el agua más fría del océano se extiende hacia el oeste hasta

el Pacífico central y las temperaturas más calientes que la media de la superficie del mar en el Pacífico occidental están acompañadas por precipitaciones mayores que lo habitual en Australia, el noreste de Brasil, la zona andina colombiana, y la región de sur-este de Asia (Figura 2-3 b).

El indicador de mayor relevancia del ENSO a nivel internacional es el llamado Oceanic Niño Index (ONI), en español Índice Oceánico Niño, desarrollado por la NOAA en los años 50. El ONI es un índice de media móvil de tres meses que mide la anomalía de la temperatura superficial del mar en la región 3.4 del Océano Pacífico tropical. Cuando el índice presenta valores mayores a 0.5 durante 5 meses consecutivos se define que se presenta un periodo El Niño; cuando el valor del índice es menor o igual a -0.5 sostenido por un lapso de 5 meses consecutivos se define como episodio La Niña.

**Figura 2-4:** regiones del Océano Pacífico Ecuatorial, que son vigiladas y monitoreadas en sus temperaturas y anomalías térmicas. La Región más importante y decisiva para Estudios e Investigaciones, es la denominada Niño 3.4. (arriba). Serie de tiempo del ONI (abajo). (Fuente: NOAA/NCEP/CPC)



Por otro lado, el ENSO presenta diferentes manifestaciones a nivel espacial, dado que algunas en algunas zonas ni se perciben los efectos, mientras que en algunos sectores como el energético

Los efectos en Colombia de la oscilación ENSO son variables de acuerdo a tiempo y espacio. Según Montealegre (2007) los eventos El Niño/La Niña afectan de manera importante los regímenes de precipitación y temperatura del aire en Colombia; cuando se presenta el fenómeno El Niño/La Niña hay una tendencia hacia la disminución/aumento de los volúmenes de precipitación, particularmente en las regiones Andina (incluyendo el altiplano Cundiboyacense), Caribe y la parte norte de la región Pacífica. Añade también que el efecto sobre el régimen de precipitación en Colombia derivado de los eventos El Niño no sigue un patrón común, por cuanto las deficiencias son más acusadas en algunas áreas, menos en otras y en algunas ni siquiera se perciben, se puede establecer que, en general, el efecto es diferencial a lo largo y ancho del territorio nacional.

#### **2.2.4 Variabilidad climática interdecadal**

“En esta escala se manifiestan fluctuaciones del clima a nivel de décadas. Comparativamente con la variabilidad interanual, la amplitud de estas oscilaciones es menor. Ésta es una de las razones por las cuales este tipo de variabilidad pasa desapercibida para el común de la gente. No obstante, estas oscilaciones de largo plazo están influyendo notablemente en las actividades de la sociedad en ciclos interdecadales y resultan muy importantes en la determinación de posibles tendencias en las variables climáticas” (Montealegre J. E., 2012).

#### **2.2.5 Cambio climático**

Se denomina cambio climático a la modificación de las condiciones predominantes en el largo plazo (siglos, milenios, entre otros). Dichos cambios se encuentran influenciados por factores externos tales como: ciclos solares de largo plazo, cambios de la geometría de la órbita terrestre, cambios en la geometría de la incidencia de los rayos solares a la superficie terrestre e impacto de meteoritos, y por factores internos tales como: la deriva continental, cambios en la composición atmosférica, interacción entre componentes sistema Tierra y procesos antrópicos (incremento en la concentración de gases de efecto

invernadero como el dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, metano CH<sub>4</sub>, óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>, entre otros) (Pabón , 2011)

### **2.2.6 Efectos del clima en la agricultura**

Puntualmente, Colombia acumuló más del 50% de las pérdidas en mayores costos de provisión de los servicios básicos de electricidad y agua, debido principalmente impactos provenientes de variaciones del clima manifestados a través de sequías, incendios forestales y en menor medida de heladas (altiplanicie), con pérdidas por encima de 500 millones de dólares (Sólo para el evento Niño 97-98).

Uno de los fenómenos que mayor impacto produce en el sector agropecuario es el relacionado con el ENSO, debido a la drástica alteración de los promedios normales de las variables climáticas que se producen en las temporadas agroclimáticas, causando efectos adversos sobre la agricultura en general.

En las zonas donde los eventos ENSO influyen el comportamiento de las variables climáticas, la actividad agrícola es una de las más afectadas ya que según sea la intensidad del fenómeno se incrementa la probabilidad que se alteran los ciclos fenológicos de los cultivos. La Comunidad Andina de Fomento (CAF) en su informe del 2006 sobre el fenómeno de El Niño 1997-1998 en Colombia describe que el evento altera las condiciones climáticas generando altas temperaturas y déficit de lluvias, así como variaciones en el ciclo de entrada de las mismas, manifestándose en deficiencia hídrica generalizada en las principales regiones productoras del país. Asimismo señala que el evento ocasiona incrementos de problemas fitosanitarios, reducción de los rendimientos agrícolas y pecuarios y el aumento coyuntural de los precios de los alimentos para el consumidor final. Según cálculos del ministerio de agricultura la reducción de los rendimientos agrícolas es cercana al 5%. (CAF, 2006)

Los impactos de La Niña se evidencian claramente en Colombia con el incremento de desastres asociados con inundaciones y movimientos en masa (CAF, 2006). Puntualmente para el valle de Ubaté y Chiquinquirá, la mayor región lechera del país, el 71% de los animales en producción resultaron afectados, representando una reducción del 35% de la producción lechera de la zona (Torres, 2011).



Según Rojas (2011), cuando los eventos ENSO cubren periodos de dos años consecutivos (más usual en eventos La Niña), el impacto negativo en los cultivos es fuerte, debido a que el periodo de finalización del evento (fase madura) coincide con la primera temporada seca, alterando los promedios normales de lluvia principalmente (Montealegre J. E., 2012). Por ejemplo para el cultivo de maíz ubicado en el municipio de Cereté (Córdoba), los rendimientos potenciales caen aproximadamente en un 5% por debajo del rendimiento potencial calculado para dicha área (FAO Colombia, 2013).

## **2.3 Eventos climáticos extremos**

Se definen a los eventos climáticos extremos (fenómenos meteorológicos o climáticos extremos) como la ocurrencia de un valor de una variable climática por encima (o por debajo) de un valor de umbral cercano al extremo superior (o inferior) de la media de valores observados de la variable (IPCC, 2012). Otra definición señala que un evento extremo es un episodio, suceso o evento meteorológico que es raro, o infrecuente, según su distribución estadística para un lugar determinado, entendiendo a “raro” como todo episodio que se encuentre por encima del percentil 90 o por debajo del 10 en la función de probabilidad observada (IPCC, 2007).

Dentro de los eventos climáticos extremos más comunes están: los excesos de precipitación, los déficits de lluvias o sequías, las granizadas, los descensos de temperatura o heladas, los ventarrones, entre otros, descritos en la sección C del apéndice de anexos

## **2.4 Heladas**

### **2.4.1 ¿Qué es una helada?**

En principio una helada, puede considerarse como unas condiciones existentes cuando la temperatura del objeto libremente expuesto desciende al punto de congelación o por debajo de él, sin tener en cuenta si se forman o no cristales de hielo (Artunduaga, 1980), pero desde el concepto del meteorólogo, se define como la ocurrencia de una temperatura igual o menor a 0°C a un nivel de 2 metros sobre el nivel del suelo, es decir al nivel reglamentario al cual se ubican las casetas de medición meteorológica (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).

La helada, como riesgo agrícola, ocurre cuando la temperatura del aire desciende a temperaturas tan bajas que producen algún daño a las plantas, que puede variar desde la destrucción parcial de los tejidos en órganos determinados de las plantas, hasta la muerte de las mismas plantas (Fernandez Long & Barnatán, 2011). En éste tipo de definiciones entran en juego aspectos fisiológicos, como la resistencia o susceptibilidad del cultivo a bajas temperaturas en sus diferentes estados de desarrollo, altura de la planta sobre el nivel del suelo y la temperatura de la hoja (Mayorga, González, & Hurtado, 2008), además pueden entrar a jugar factores de tipo biológico; como pueden ser la especie, variedad, estado fenológico, condiciones de sanidad, entre otros; y factores meteorológicos; entre los que se encuentran la duración del período de bajas temperaturas, la temperatura mínima alcanzada, la velocidad de enfriamiento, y las condiciones atmosféricas que anteceden o acompañan a las bajas temperaturas (Fernandez Long & Barnatán, 2011).

### **2.4.2 Dinámica del daño por la helada**

El daño por helada pueden tener en efecto drástico sobre toda la planta o puede afectar únicamente una pequeña parte del tejido, reduciendo el rendimiento del cultivo y/o afectando la calidad de producto (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

El daño comienza por la formación del primer núcleo de cristal de hielo dentro de los tejidos, a expensas del vapor de agua presente en los espacios intercelulares (hielo extracelular). En condiciones naturales el hielo nunca se formaría dentro de las células (hielo intracelular) (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

El hielo cristalizado actúa como aire seco, porque la presión de vapor de agua a partir del mismo es menor que a través de una disolución enfriada. Las células comienzan a perder agua, que se traslada (por valores menores de potencial agua), desde las vacuolas hacia las paredes celulares y desde allí a los espacios intercelulares donde se congela en contacto con los núcleos de hielo previamente formados en dichos espacios (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

El protoplasto pierde agua, se contrae, y aumenta la concentración de las moléculas disueltas (Fernandez Long & Barnatán, 2011), dicho de otra manera, la formación de hielo dentro del protoplasto causa una “ruptura mecánica” de la estructura

protoplasmática cuya magnitud del daño depende directamente de la velocidad del descenso térmico y de la duración de las bajas temperaturas. El daño depende también de la velocidad de licuación (descongelamiento): cuando se produce rápidamente (mañanas sin nubes, rápido calentamiento del aire por radiación solar) el daño puede ser muy severo e irreversible, pero cuando se produce lentamente, la célula puede rehidratarse sin sufrir daño alguno (Fernandez Long & Barnatán, 2011) (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

Conforme que hay un crecimiento de la masa de hielo extracelular, las células van muriendo, ello explicado por qué la presión de vapor saturación es más baja sobre el hielo que sobre el agua, provocando evaporación del agua líquida al interior de la célula pasando a través de la membrana celular depositándose sobre los cristales de hielo fuera de la célula. A medida que el agua sale del interior de las células se reduce el riesgo de congelación, pero la acumulación de hielo extracelular hace que las células adyacentes se deshidraten provocando desecación en las plantas (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

Desde el punto de vista agrometeorológico pueden presentarse daños por helada, aún con temperaturas mayores a 0°C. Según Geiger (1965) la temperatura de las hojas y otros órganos suele estar 3 o 4°C más baja que la del aire, por efecto de la radiación que emite que estos organismos emiten a la atmosfera.

Por otro lado, existe otro mecanismo que puede ocasionar la pérdida de botones florales, hojas y frutos sin que llegue efectivamente a helar, debido a que todo tipo de estrés (hídrico, salino, térmico, etc.) puede desencadenar la síntesis y/o liberación de etileno, compuesto gaseoso de naturaleza hormonal responsable del fenómeno de abscisión (caída) de hojas, pétalos, estambres, pistilos y frutos, y en este caso se lo denomina “daños por enfriamiento” (Fernandez Long & Barnatán, 2011).

Hay que tener en cuenta que la sensibilidad que un vegetal tiene al frío depende de su estado de desarrollo. Los estados fenológicos más vulnerables al frío son la floración y el cuajado de frutos (Fernandez, 1995).

- **Daño de la helada en pastos**

El descenso de las temperaturas hasta el umbral de daño (helada agrometeorológica) en plantas con sensibilidad, ocasionan en principio, en células y tejidos, un cambio reversible en el estado físico de las membranas por debajo de una temperatura crítica, variable de especie a especie, por debajo de la cual no son lo suficientemente fluidas para mantener las actividades fisiológicas normales (Marquinez Casas, 2001). Las disfunciones fisiológicas y síntomas visibles, ocurren como un proceso secundario dependiendo tanto del tiempo y severidad del estrés como de la condición morfológica y fisiológica de los tejidos y órganos en plantas y pastos (Marquinez Casas, 2001).

### 2.4.3 Clases de heladas

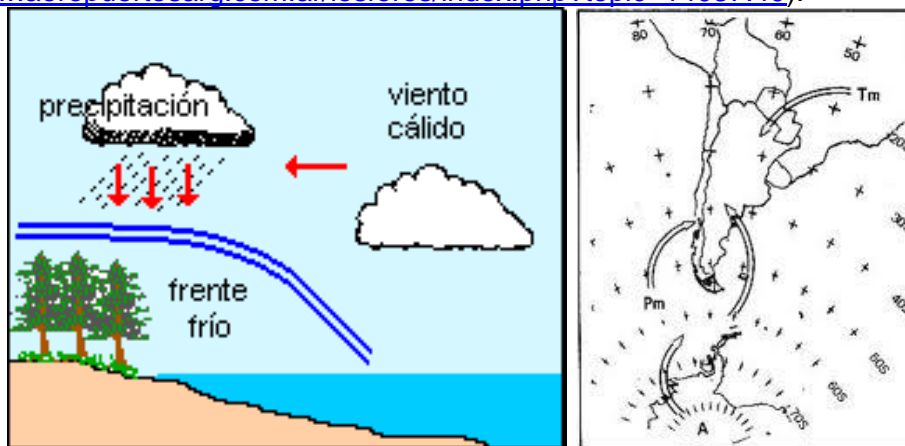
Según sus causas las heladas se clasifican en:

- **Helada por advección**

Se dice que una helada es de advección, cuando es ocasionada por la invasión de grandes masas de aire frío procedentes de regiones polares y cuya acción es continua y por varios días (Figura 2-5) (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).

Este tipo de heladas ocurren cuando una masa de aire, cuya temperatura es menor a  $0^{\circ}\text{C}$ , se posa encima de una región, desplazando la masa de aire más caliente que originalmente estaba. Este tipo de masas de aire vienen acompañadas de vientos moderados a fuertes, abundante nubosidad, baja humedad, descartando inversión de temperatura (Artunduaga, 1980) (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

**Figura 2-5:** helada provocada por corriente de aire frío (Tomado de: <http://www.aeropuertosarg.com.ar/losforos/index.php?topic=14037.40>).



En la mayoría de ocasiones, el fenómeno empieza como una helada de advección, la cual es característica de las latitudes medias y altas, transformándose posteriormente a noches con heladas de tipo radiativo (Snyder & de Melo-Abreu, 2010), las cuales pueden ser clasificadas como **heladas mixtas** (Fernandez Long & Barnatán, 2011).

- **Helada por evaporación**

Puede considerarse como una helada de evaporación, cuando después de una precipitación desciende la humedad relativa del aire y la vegetación intercepta parte de la precipitación reteniendo el agua en el follaje y troncos, produciendo una intensa evaporación. El calor de evaporación que el agua necesita para pasar del estado líquido al gaseoso lo toma de las plantas y en consecuencia la temperatura de algunos órganos vegetales desciende a límites que ocasionan daños. La cantidad de agua evaporada, está en función de la humedad relativa, la temperatura y la velocidad del viento (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).

- **Helada por radiación**

Este tipo de heladas es típica de las regiones tropicales y son factibles de presentarse a partir de los 2500 metros sobre el nivel del mar (msnm), y básicamente se origina por la pérdida de calor que sufren las plantas y el suelo y que ceden a la atmosfera durante la noche por medio del proceso de radiación. (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).

Hay dos subcategorías de heladas de radiación:

- **Helada blanca:** ocurre cuando el vapor de agua se deposita sobre la superficie y forma una capa blanca de hielo que se denomina normalmente “escarcha” (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).
- **Helada negra:** ocurre cuando la temperatura cae por debajo de 0°C y no se forma hielo sobre la superficie. Si la humedad es suficientemente baja, entonces la temperatura de la superficie puede que no alcance la temperatura del punto de rocío y no se formará escarcha (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

Cuando la humedad es alta, el hielo es más probable que se deposite y se produce una helada blanca. Como el calor se libera durante el proceso de deposición del hielo, las

heladas blancas normalmente producen menos daño que las heladas negras (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

#### **2.4.4 Proceso físico**

Para el análisis de la configuración de una helada, es importante mencionar los procesos físicos que describen el calentamiento y enfriamiento de la superficie terrestre.

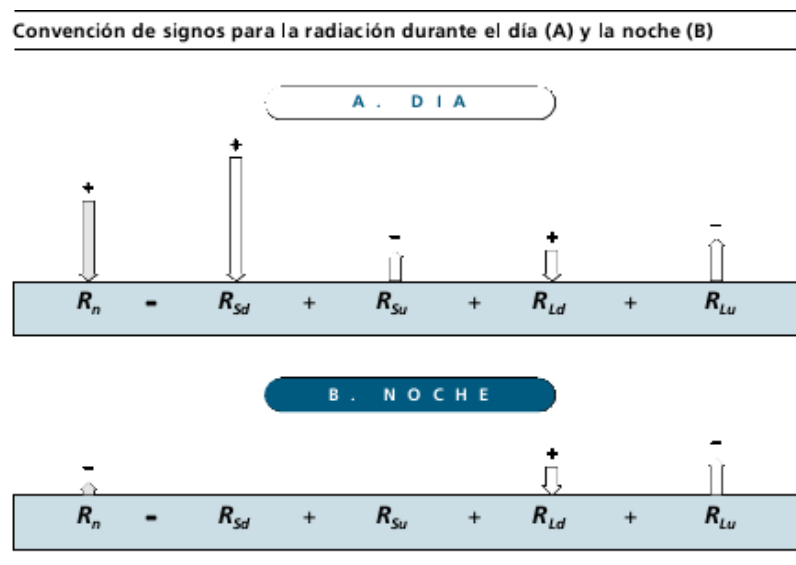
- **Balance de radiación**

El balance de radiación es uno de los principales determinantes de la temperatura del aire y del suelo, el cual integra todos los flujos de energía que ingresan y que salen del sistema suelo-atmósfera-cultivo (Fernandez Long & Barnatán, 2011).

La energía emitida por el sol pasa por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, reflexión en las nubes y de absorción por las moléculas de gases y por partículas en suspensión, alcanza la superficie terrestre oceánica y continental que la refleja o la absorbe. La radiación que absorbe la superficie es devuelta en dirección al espacio exterior con la cual calienta la atmósfera. De la energía absorbida por el suelo, parte penetra en el terreno, parte se utiliza en la evaporación del agua existente en el suelo y luego es transportada en la atmósfera en forma de calor latente y la última parte, viene cedida por contacto, a la atmósfera, que la distribuye en su interior mediante un mecanismo de convección turbulenta (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).

La radiación proveniente del sol, al ingresar a la atmósfera y chocar con algún obstáculo se convierte de energía electromagnética a energía calórica o cinética, calentando la tierra durante el día. La superficie de la tierra al emitir permanentemente energía calórica, calienta el vapor de agua y otros gases de la atmósfera, los que a su vez emiten su energía propia, energía que se suma para calentar la tierra. Durante la noche, la tierra deja de recibir energía del sol, pero se convierte en un cuerpo que irradia energía al espacio (IDEAM, 2004).

**Figura 2-6:** balance de radiación entre el suelo y la atmosfera (Snyder & de Melo-Abreu, 2010, pág. 48)).



En términos físicos, se habla que la radiación neta ( $R_n$ ) es la cantidad de energía retenida por la superficie, por lo que en el día ésta tiene el signo positivo (+), o sea que recibe más radiación que la que es capaz de emitir. El mayor aportante de energía en el día es el sol y el cielo ( $R_{sd}$ ), mientras que existe una cantidad de energía reflejada por la superficie ( $R_{su}$ ). También recibe energía de onda larga emitida por otros cuerpos ( $R_{ld}$ ) hacia la superficie, y a su vez ésta emite onda larga hacia la atmosfera ( $R_{lu}$ ).

La radiación neta ( $R_n$ ) en la noche, presenta signo negativo (-) debido a que no hay aporte de la radiación solar y del cielo ( $R_{sd}$ ), como tampoco energía reflejada ( $R_{su}$ ). En este caso es mayor la pérdida de energía de onda larga emitida por la superficie ( $R_{lu}$ ) que la recepción de energía emitida por otros cuerpos hacia la superficie terrestre ( $R_{ld}$ ) (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

#### • Proceso de enfriamiento

El frío es una condición relativa debido a la falta de recepción de calor. La recepción de calor puede ser explicada a partir de los siguientes procesos:

- **Conducción:** la energía es transmitida a partir de un conductor que por medio de partículas internas enfrían o calientan el objeto.

- **Convección:** movimiento vertical de energía, cuando gana energía la tierra por parte de la radiación solar, ésta a su vez emite radiaciones que calientan el aire que está cerca.
- **Advección:** implica un movimiento horizontal de la energía
- **Radiación:** la energía pasa de un objeto a otro sin la necesidad de un medio de propagación, un ejemplo de éste comportamiento es la luz del sol

- **Variación de la temperatura**

La Tierra tiene una temperatura media relativamente constante en el tiempo, por la existencia del balance entre la cantidad de radiación solar entrante y la radiación terrestre saliente. La temperatura del aire es el resultado del efecto calórico que produce la radiación solar, influenciada por otros aspectos como la latitud, altitud de lugar, la circulación de los vientos y el contenido del vapor de agua en la atmósfera (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).

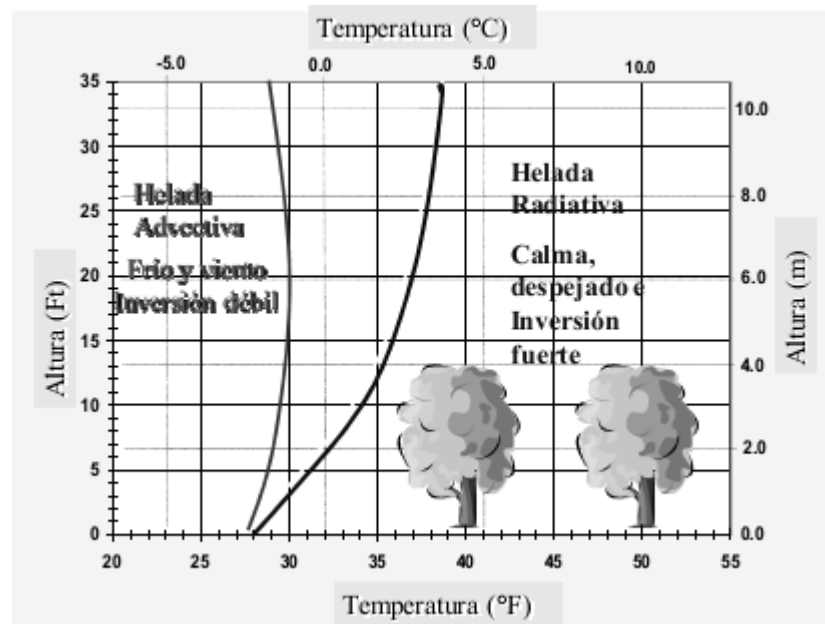
En la zona ecuatorial, los valores de radiación recibidos sobre la superficie son prácticamente constantes durante todo el año, siendo afectados más por la nubosidad. Como consecuencia de la poca variación que manifiestan los valores de radiación diarias en los trópicos, las diferencias de las temperaturas medias para un sitio dado son también pequeñas, presentando sus mayores variaciones en sus valores extremos (máximas y mínimas). Estas variaciones en los extremos presentan una considerable amplitud, especialmente durante los periodos secos del año, dando lugar así a la presencia de heladas (Artunduaga, 1980).

- **Variaciones de la temperatura con la altura:** Como una condición normal, la temperatura del aire descende en función de la altura en una proporción de aproximadamente de  $0.6^{\circ}\text{C}$  por cada 100 m. Esta situación es bastante notable en los trópicos, en donde las temperaturas medias mensuales y anuales de un sitio están dadas básicamente por la altitud, con variaciones más o menos importantes debidas a ciertas condiciones locales que pueden presentarse (zonas deforestadas o erosionadas, regiones desérticas, situaciones fisiográficas que afectan la circulación de los vientos y la humedad del aire, masas de agua, construcciones, etc.) (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).



- **Variación nocturna – Inversión de la temperatura:** como se ha mencionado antes, durante la noche, la superficie de la tierra se enfría rápidamente debido a la pérdida de calor por radiación, y la temperatura del suelo se hace inferior a la de la capa de aire adyacente. Tan pronto como esto ocurre, el aire adyacente comienza a enfriarse por conducción repitiéndose el proceso diurno pero en sentido inverso, tendiendo el aire frío a permanecer en la superficie, presentándose así el fenómeno conocido como inversión de temperatura (Artunduaga, 1980).

**Figura 2-7:** inversión típica de las heladas (Fernandez Long & Barnatán, 2011).



### 2.4.5 Factores que determinan la ocurrencia de heladas

Se enumeran un gran número de factores que favorecen que haya bajas temperaturas, los cuales se encuentran atados a factores de mayor escala como la circulación atmosférica y el balance de radiación. La consecuencia directa de los factores mencionados son las heladas de advección y las heladas de radiación (Fernandez Long & Barnatán, 2011). Como se mencionó anteriormente, en el país son más frecuentes las heladas de radiación, debido a la variación de los extremos de temperatura como consecuencia de la nubosidad imperante en la zona, que interviene directamente en el balance de radiación.

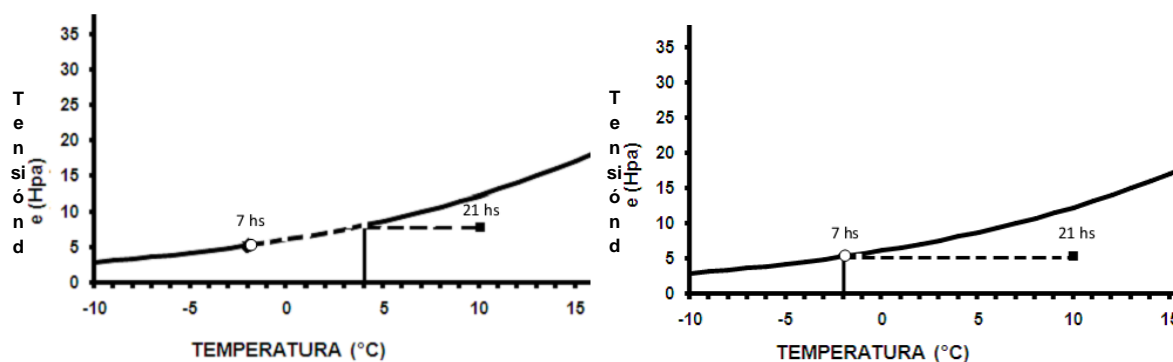
Por otro lado existen factores locales o micrometeorológicos que favorecen la ocurrencia de heladas. Identificar estos factores permitirá determinar las zonas con mayor susceptibilidad a dichos eventos, así como la identificación de métodos que mitiguen sus efectos.

- **Concentración del vapor de agua en masas locales**

El vapor de agua contenido en la atmósfera juega un papel importante en regular la emisión de calor de la tierra. Generalmente, a mayor sea la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, menor será la pérdida neta de calor radiativo hacia el espacio y más lenta será la caída de temperatura en una noche clara y calmada. Esto ocurre debido a que el vapor de agua absorbe algo de la radiación de onda larga emitida por la superficie terrestre la cual a su vez es emitida nuevamente hacia la tierra compensando en parte la pérdida original de calor (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).

En la Figura 2-8 se aprecia que el valor de la temperatura del aire a las 21 hs., es de 10°C (punto negro), mientras la temperatura del punto de rocío en la izquierda se encuentra en 4°C, provocando una helada blanca y en la derecha se encuentra en -2°C provocando una helada negra

**Figura 2-8:** desarrollo de una helada blanca (izquierda) y una helada negra (derecha). (Fernandez Long & Barnatán, 2011).



- **Movimiento turbulento del aire – escasa nubosidad**

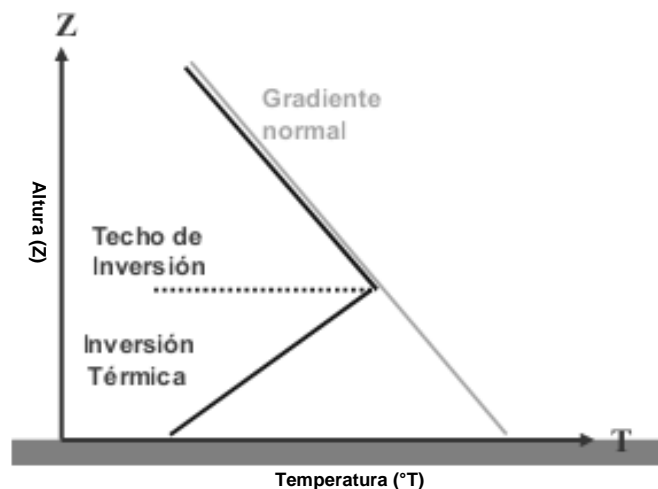
Un factor de importancia es el movimiento de las masas del aire. Los cielos despejados en la noche provocan que haya una alta pérdida de calor por radiación saliente efectiva, cayendo la temperatura drásticamente. Cerca de la superficie la temperatura disminuye

más rápido provocando una inversión, por lo que el aire se estratifica rompiendo con el gradiente normal de temperatura (“inversión térmica”) (Fernandez Long & Barnatán, 2011).

A partir de cierta altura, la temperatura se comporta de nuevo de acuerdo con el gradiente normal de temperatura, a dicha altura se denomina “techo de inversión”, el cual varía de acuerdo a las características del suelo, cobertura vegetal, condiciones meteorológicas, pero generalmente se encuentra entre 9 y 60 m (Fernandez Long & Barnatán, 2011).

Generalmente un movimiento de aire provoca que los vientos de los estratos se mezclen haciendo descender las capas superiores que están más calientes y elevando las inferiores, actuando como defensa contra las heladas (Artunduaga, 1980).

**Figura 2-9:** gradiente normal de temperatura e inversión térmica (Fernandez Long & Barnatán, 2011).



- **Drenaje nocturno del aire – superficie del terreno**

La ausencia de viento favorece que el aire frío, dado su mayor densidad, ocupe las capas cercanas al suelo cuya superficie se está enfriando por la pérdida de radiación durante la noche. Las características del relieve del suelo y los accidentes geográficos de su superficie determinan la dirección e intensidad del flujo nocturno de aire frío y constituye un importante factor en la ocurrencia de las heladas. Las pequeñas irregularidades del

terreno y con más razón las grandes, determinan que el aire frío, se escurra hacia los niveles más bajos estabilizándose en ellos o donde algún obstáculo impida el escurrimiento. Este movimiento de aire, por su poca velocidad, es incapaz de provocar turbulencia y por lo tanto no modifica la inversión térmica existente. El drenaje de aire frío nocturno es el que origina su acumulación en ciertos lugares denominados “bolsones de heladas” donde se registran las temperaturas más bajas al producirse este fenómeno (Fernandez Long & Barnatán, 2011).

- **Estado del suelo**

La composición del suelo constituye un factor de gran influencia ya que es capaz de afectar el balance energético responsable del calentamiento o enfriamiento de la superficie terrestre; variables climáticas como la precipitación que afectan directamente el contenido de humedad del suelo o la temperatura que afecta la conductividad calorífica, repercutiendo en la planta. El suelo muestra grandes variaciones espaciales y en su composición (contenido de materia orgánica, agua, aire, agregación de las partículas), por lo que la transferencia de calor hacia las capas más profundas durante el día, almacenándola para ser transportada en la noche hacia el aire estará directamente relacionada a su estructura (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

La transferencia de calor en el suelo es directamente proporcional a la conductividad calórica del mismo, la cual es definida como la capacidad de conducción de calor en un material. Como el aire es un mal conductor del calor (baja magnitud), los suelos secos con amplios espacios intercelulares tienen menor conductividad térmica, La conductividad térmica de los suelos secos varía, pero es aproximadamente de 0.1, 0.25 y 0.3 W.m-1°C-1 para suelos orgánicos, arcillosos y arenosos respectivamente. Si los suelos están casi saturados de agua, la conductividad es aproximadamente de 0.5, 1.6 y 2.4 W.m-1°C-1 para los tres tipos generales de suelo (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

Los cambios de temperatura están afectados también por la densidad aparente (contenido total de porosidad en el suelo) y por el calor específico del mismo. En general, las condiciones permanentes (composición fisicoquímica) y temporarias (contenido de humedad y estado de agregación) son las condiciones del suelo que tienen una marcada influencia sobre la intensidad de las heladas que se producirán sobre el mismo a

consecuencia de la variación de la temperatura de su superficie (Fernandez Long & Barnatán, 2011).

Cuando el suelo presenta baja conductividad térmica derivado de las condiciones permanentes y temporales del suelo, y se presentan bajas temperaturas superficiales como ocurre en las heladas, el metabolismo de la planta (pastos) disminuye, principalmente a nivel de raíces, ocasionando una alteración en su crecimiento.

- **Vegetación**

La interacción entre la superficie del suelo y el aire por encima, es de vital importancia, ya que a través del grosor de la capa ocupada por la vegetación (variable en altura y densidad), puede tener efectos en la transferencia de calor, casi exclusivamente por conducción, ya que su difusión es realizada en forma turbulenta. En consecuencia, hay una disminución del viento y de los movimientos turbulentos en el estrato interferido por la vegetación en las capas bajas de la atmosfera; durante el día, la vegetación impide la recepción de la radiación solar por parte del suelo y el almacenaje de calor en el mismo y, durante la noche, que el calor se difunda con rapidez hacia las capas bajas de la atmósfera produciéndose de esta manera mínimas más intensas. Otro efecto que produce la vegetación cultivada o espontánea es el de intensificar el enfriamiento al producirse una helada por efecto de la transpiración de las plantas, ya que, en este proceso el agua líquida absorbe energía para pasar a la fase de vapor, consumiendo energía del medio circundante al vegetal (Fernandez Long & Barnatán, 2011).

La existencia de algún tipo de vegetación pequeña sobre el suelo reduce la evaporación, pero de todas maneras hace que la temperatura del aire por encima del mismo sea menor generando heladas más intensas. Esas capas vegetativas limita el flujo de calor desde el suelo hacia la superficie, causando temperaturas mínimas más bajas (Fernandez Long & Barnatán, 2011).

### **2.4.6 Las heladas en Colombia**

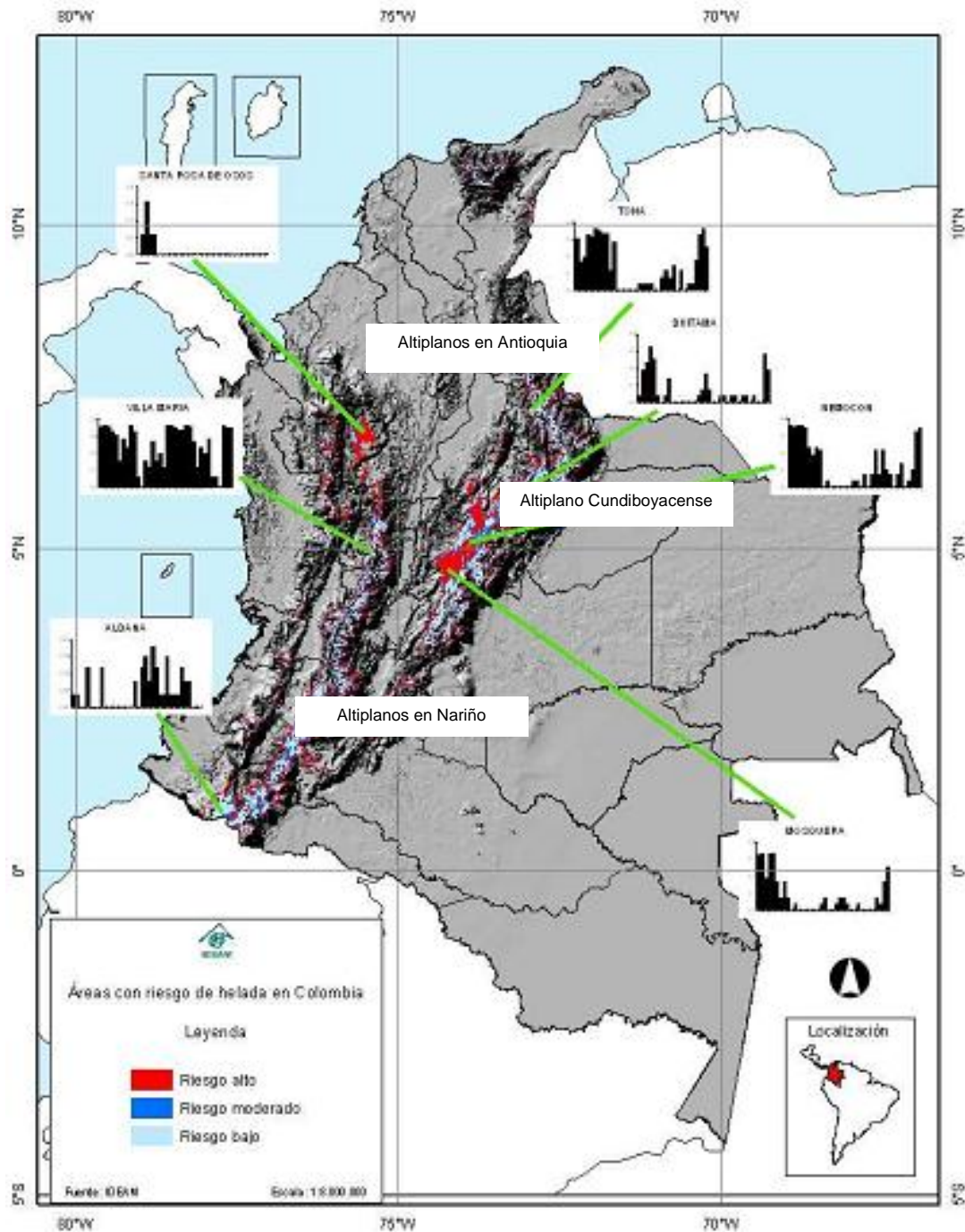
En Colombia es frecuente que se presente el fenómeno de las heladas en algunas zonas, afectando principalmente áreas por encima de los 2500 m.s.n.m. en las épocas secas. El único tipo de helada que se presenta en el territorio nacional, salvo algunas

excepciones, es la de radiación, siendo la helada blanca la de mayor ocurrencia. Especialmente los altiplanos son los territorios más susceptibles donde se ubican cultivos de papa, flores, hortalizas y pastos (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).

A nivel espacial las áreas más susceptibles a heladas se encuentran en los Altiplanos fríos, localizados entre 2500 y 3000 msnm, correspondiéndoles temperaturas medias entre 9°C y 12°C, cuyas características de cielos despejados o escasa nubosidad y con humedad del aire muy baja favorecen la pérdida de radiación terrestre en las horas de la noche y madrugada (Hurtado G. , 1996). El **altiplano Cundiboyacense** (donde se encuentra el valle de Ubaté y Chiquinquirá) en la Cordillera Oriental y los altiplanos de Túquerres e Ipiales en Nariño y el de Paletará (Cauca) al suroccidente del país, son las zonas de mayor susceptibilidad a heladas (Figura 2-10).

En Colombia las épocas secas son las de mayor probabilidad de ocurrencia de heladas. La probabilidad de presentación de una helada en áreas críticas del altiplano Cundiboyacense supera el 90% (Funza-Madrid-Mosquera, Nemocón-Ubaté y Duitama-Sogamoso), mientras en otras zonas no supera más del 50% de probabilidad (Mayorga, González, & Hurtado, 2008). Se presume que la variabilidad climática de la zona pueda influenciar la ocurrencia de las heladas, especialmente los eventos que inhiban la formación de nubes.

**Figura 2-10:** áreas con riesgo a heladas según el IDEAM (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).



## 2.5 Pronóstico y control de heladas

Pronosticar una helada permite conocer de manera anticipada la ocurrencia del evento, de modo que se pueda emprender medidas de protección y control con el fin de disminuir

al máximo los daños ocasionados. Para tal propósito es necesario realizar un seguimiento al comportamiento diario de la temperatura o en su defecto una predicción de la temperatura mínima que no es más que a través del análisis previo, determinar el valor probable de la variable.

### **2.5.1 Predicción de las temperaturas mínimas**

El propósito de generar una predicción acertada permite poner en marcha los métodos activos de protección contra las heladas, en los lapsos de tiempo que sea requerido, evitando así la pérdida de recursos (exceso de riego, calderos entre otros). Aunque existen métodos de predicción desarrollados por los servicios meteorológicos nacionales a nivel sinóptico y/o de mesoescala, es posible obtener pronósticos través de metodologías que utilizan datos locales a partir de balances de radiación.

Según Kalma *et al.* (1992) los modelos a escala micrometeorológica no pueden predecir satisfactoriamente la temperatura del aire a partir de únicamente un balance de energía en la superficie, incluso estableciendo con precisión las diferencias entre la temperatura de la superficie y del aire, debido a la incapacidad de: a) la medición del flujo de calor sensible turbulento en el intervalo típico de las noches de helada; b) tener en cuenta la advección; c) tener en cuenta las variaciones espaciales en la emisividad de la radiación desde la superficie, por lo que propusieron estimar la tasa de enfriamiento de una columna de aire, cuyo proceso es impracticable debido a la dificultad de medición del flujo radiativo como el flujo de calor sensible turbulento que depende de los perfiles verticales de viento, la humedad y la temperatura (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

### **2.5.2 Generalidades sobre métodos activos y pasivos de control de heladas**

El control y/o previsión de la helada puede definirse como un método, de largo plazo o corto plazo (al instante), que busca a través de herramientas de carácter biológico, ecológico y tecnológico (sólo corto plazo), anular los efectos inmediatos de una helada, con el fin de proteger y contrarrestar las secuelas ocasionadas por dicho evento en los sistemas de producción o cultivos (dependiendo de su sensibilidad) (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).



Existen una infinidad de métodos de protección contra heladas, pero algunos de éstos no son del todo aplicables a latitudes tropicales, ya que se enfocan en el control de las heladas de tipo advectivo, o también por qué son económica y/o tecnológicamente inviables en el país.

Al respecto Snyder *et. al.* (2010) categorizó los métodos de protección entre pasivos y activos. Los métodos de protección pasivos son considerados como métodos de largo plazo, abarcando criterios ecológicos y biológicos, los cuales son implementados con bastante anterioridad a la época de heladas.

Los métodos de protección pasivos recomendados por Snyder *et. al.* (2010) para cualquier cultivo, incluidos pastos y forrajes, más comunes a nivel del trópico son:

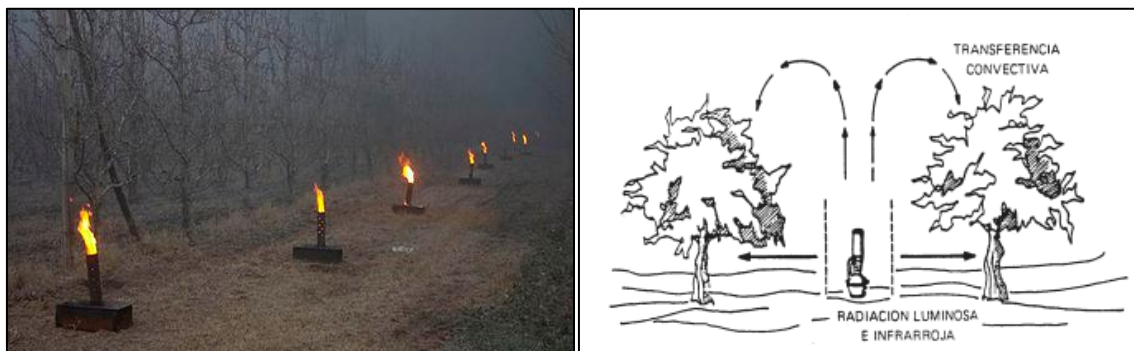
- **La selección del área de siembra del cultivo y manejo del mismo:** se refiere a la susceptibilidad territorial del cultivo a las heladas, por lo que para mayor seguridad se recomienda a los agricultores establecer técnicamente, hasta donde sea posible, y/o empíricamente el área de cultivo.
- **La protección a través de cercas vivas:** las cercas vivas proporcionan un control de los flujos de aire frío sobre el cultivo, por lo que los árboles y arbustos entre otras especies arbóreas los contrarrestan efectivamente.
- **Selección de especies resistentes:** las plantas con mayor tolerancia a bajas temperaturas minimizan las pérdidas tanto productivas como económicas.
- **Buen manejo en la fertilización, control de plagas y manejo del suelo:** evitar al máximo el laboreo del suelo debido a que los espacios libres de cobertura y recién fertilizados, disminuyen la capacidad de retención de calor del suelo ocasionando pérdida de energía con mayor rapidez.
- **Riego:** Cuando los suelos están secos, hay más espacios de aire que inhiben la transferencia y el almacenamiento del calor. Por lo que en suelos secos la protección contra heladas se mejora humedeciendo los suelos.

Por otro lado, los métodos de protección activos, o de corto plazo, buscan intervenir la helada en el momento que ésta sucede o máximo un día de antelación, por lo que éstos se basan más en equipos y soluciones técnicas que reproducen métodos físicos (balance de radiación), creando ambientes artificiales que contrarrestan desde el punto de vista energético las bajas temperaturas.

Los métodos de protección activos recomendados por Snyder *et. al.* (2010) más comunes a nivel del trópico son:

- **Estufas y calderas:** estas permiten calentar el aire alrededor, reemplazando la pérdida de energía causada por el escape de radiación. Son recomendadas para heladas de radiación como las que se presentan en Colombia, pero debido al costo de adquisición, mantenimiento y funcionamiento es poco frecuente su uso, salvo en agricultura protegida como cultivos de flores. En países de latitudes medias (Chile, Argentina, México entre otros), es muy utilizado para cultivos como frutales, viñedos, etc.

**Figura 2-11:** protección de heladas a través del calentamiento de aire por medio de estufas y calderas. Tomado de: <http://www.hydroenv.com.mx/> (Izquierda) y Centro Nacional de prevención de desastres de México (Derecha).



- **Ventiladores:** la función de los ventiladores es la de empujar el aire de manera horizontal, mezclando el aire más caliente que se encuentra por encima de la superficie, con el aire más frío cercano al suelo. El uso de estos equipos se da en cultivos altamente tecnificados, descartando cualquier aplicación en el país

**Figura 2-12:** protección de heladas a través de la mezcla de las capas de aire por medio de ventiladores y helicópteros. Tomado de: <http://www.hydroenv.com.mx/>



- **El riego por aspersión:** a diferencia del riego simple que busca humedecer el suelo, el riego por aspersión se utiliza para evitar la deshidratación de la hoja a causa del congelamiento producido por la helada, por lo que al aplicar una lámina de agua encima de la hoja, está ayuda a que el calor latente liberado del congelamiento evite el descenso de la temperatura en la hoja (Artunduaga, 1980).

**Figura 2-13:** áreas con riesgo a heladas según el IDEAM (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).



### 2.5.1 Generalidades sobre el control de heladas en Colombia

Aunque no se conoce con certeza estadísticas que reflejen que tipos de controles aplican los agricultores ante la ocurrencia de heladas, el ministerio de agricultura y distintos gremios (Asoflores, Fedegan, Fenalce, entre otros) recomiendan por ejemplo para los

cultivos de flores, de manera constante y estricta, regar los tallos, calentar los invernaderos y usar mantas para proteger cultivos (Contexto ganadero, 2014), mientras el sector de cereales recomienda una selección adecuada del área de siembra del cultivo, un buen manejo agronómico (fertilización, control fitosanitario entre otros) y uso de semilla certificada, En el sector ganadero es común la utilización suplementos alimenticios y especies forrajeras, además de la reducción de carga animal por hectárea; además diferentes (MADR, 2014).

## **3. Materiales y métodos**

### **3.1 Zona de estudio**

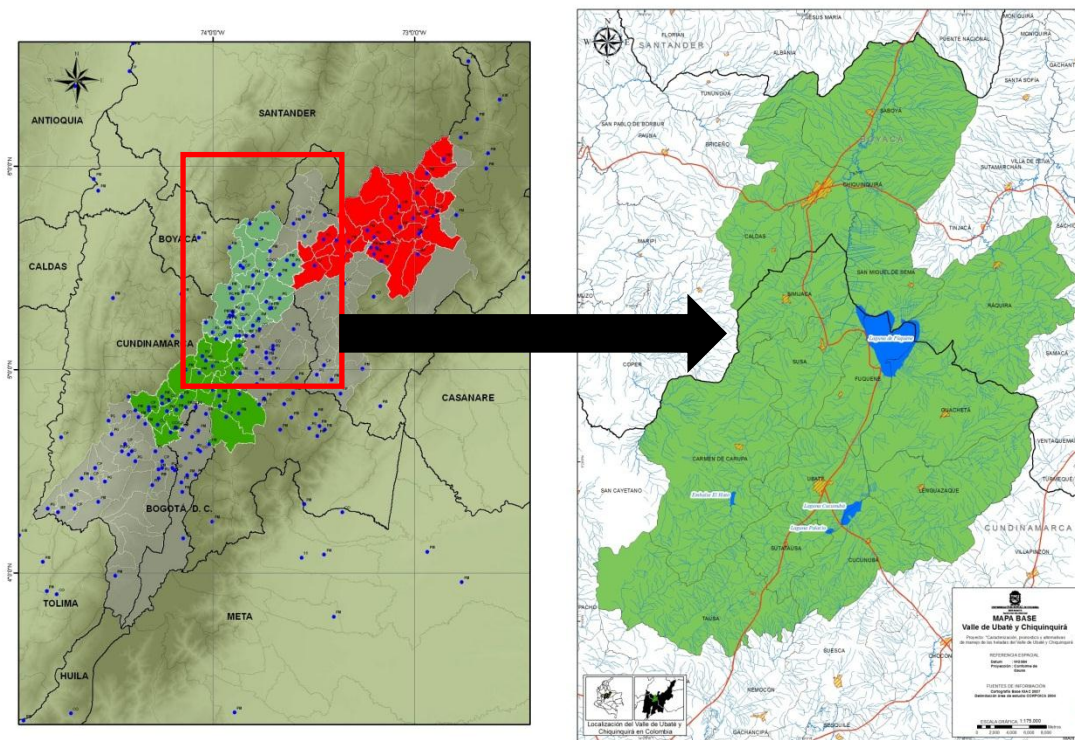
El altiplano Cundiboyacense, está conformado por un conjunto de sabanas altas, incrustadas en la cordillera oriental andina colombiana, siendo una de las zonas con mayor densidad en el país, con alrededor del 20% del total de la población colombiana, incluyendo la ciudad capital (Bogotá) (IGAC-ORSTOM, 1984).

El altiplano abarca desde el páramo de Sumapaz, hasta la base de la sierra nevada del Cocuy, forma parte de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca. Al interior de esta región se encuentran tres zonas ó micro regiones de importancia económica: la Sabana de Bogotá, Valle del río Chicamocha y el valle de Ubaté y Chiquinquirá, en el cual se enfoca ésta investigación (Corpoica, 2004)

El valle de Ubaté y Chiquinquirá se encuentra ubicado entre los 5° 03' de latitud norte y 73° 21' de longitud oeste y los 5° 54' de latitud norte y 72° 30' de longitud oeste del meridiano de Greenwich, con una extensión de 220.300 ha, comprendiendo los municipios de: Tausa, Sutatausa, Carmen de Carupa, Cucunubá, Ubaté, Lenguazaque, Guachetá, Fúquene, Susa, Guasca y Simijaca en Cundinamarca y San Miguel de Sema, Saboyá, Caldas, Ráquira y Chiquinquirá en Boyacá (Corpoica, 2004)

La altura sobre el nivel del mar varía entre los 2000 y 3000 m.s.n.m., con una precipitación media alrededor de los 1000 mm al año. Su paisaje se encuentra dominado por tierras de montaña con clima frío a muy frío.

**Figura 3-1:** altiplano Cundiboyacense (Izquierdo); valle de Ubaté y Chiquinquirá (Derecho). En verde: sabana de Bogotá; en rojo: valle del Chicamocha.



## 3.2 Información utilizada

### 3.2.1 Información climática

Se utilizaron las fuentes oficiales de información climática del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y de las Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), revisando para el altiplano Cundiboyacense las bases históricas del IDEAM y de la CAR, utilizando un total de 60 estaciones entre pluviométricas y climatológicas a escala mensual.

Se utilizaron las variables precipitación (mm), temperatura máxima (°C), temperatura media (°C), temperatura mínima (°C), humedad relativa (%) y brillo solar (horas) con el objetivo de generar los promedios mensuales multianuales para el periodo 1981 – 2010 y realizar el análisis de variabilidad climática.

Además de la serie histórica de diversos índices oceánicos, atmosféricos y océano-atmosféricos con el fin de evaluar los impactos de los fenómenos ENSO a lo largo de la zona de estudio.

La ubicación de las estaciones, las coordenadas geográficas en grados decimales, altitud y otra información puede ser consultada en el anexo A.

### **3.2.2 Índices oceánico - atmosféricos utilizados**

Como parte del estudio de la variabilidad climática en el valle de Ubaté y Chiquinquirá se requirió identificar los índices que caracterizan los procesos oceánicos y atmosféricos que alteran las condiciones predominantes de la variable climática, denominada variable dependiente o explicada (promedio normal), que para los fines del documento son las variables mencionadas en el numeral 3.2.1. Los índices, denominados como variables independientes o explicativas, intervienen de modo diferencial en el comportamiento de las variables climáticas, especialmente de la precipitación, por lo que a partir de lo mencionado por Montealegre (2009) se seleccionaron los siguientes índices para ser relacionados con las series históricas de precipitación y así establecer cuál de estos el que mejor representa la variabilidad climática de la zona.

- **Temperatura Superficial del Mar (TSM) del pacífico tropical**

Se considera como un excelente indicador de la estructura térmica de la capa superficial del océano. Por lo que se considera ésta como variable explicativa ya que se encuentra relacionada con los procesos de convección generados sobre esta superficie. El monitoreo de la TSM en los océanos se realizan a través de boyas y para el Pacífico tropical se dividen en 4 regiones que son: Niño 1+2, Niño 3, Niño 4 y Niño 3.4. Como El Niño y La Niña son fenómenos de carácter oceánico a través de los valores de TSM se han desarrollado una gran cantidad de índices para caracterizar estos fenómenos (Montealegre J. E., 2009).

- **Índice multivariado de El Niño (MEI)**

Es un índice de carácter mixto, involucra variables atmosféricas y oceánicas, el cual se obtiene a través de la media ponderada de seis variables sobre el Pacífico tropical (presión atmosférica a nivel del mar, componente zonal y meridional del viento y



superficie, temperatura superficial del mar, temperatura del aire en superficie y cantidad total de nubosidad), de modo que cuando se presentan valores positivos representan la fase cálida del ENSO (El Niño) (Montealegre J. E., 2009)

- **Índice oceánico El Niño**

Los valores del Índice Oceánico El Niño (ONI) se calculan como las medias móviles de tres puntos de la serie mensual de anomalías de la temperatura superficie del mar en la región Niño 3.4 y se obtuvieron del sitio web de la NOAA Climate prediction center (CPC) (CPC-NOAA, 2013).

### 3.2.3 Estación meteorológica de apoyo para el estudio.

Se hizo necesario realizar el emplazamiento de una estación de apoyo nombrada como Recuerdo Chiquinquirá (**Figura 3-2**), debido principalmente a la poca o nula disponibilidad de alguna estación meteorológica que hiciera un monitoreo horario de la temperatura mínima, escala necesaria para un seguimiento al desarrollo de una helada de radiación durante la noche y madrugada. El seguimiento era necesario hacerlos en el primer trimestre del año 2013 (diciembre, enero y febrero) debido a que es la temporada de mayor recurrencia de estos eventos extremos en el altiplano Cundiboyacense (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).

**Figura 3-2:** emplazamiento de la estación Recuerdo Chiquinquirá



La estación fue ubicada en el municipio de Chiquinquirá, finca El Recuerdo, a los 5°35'13.89" Latitud Norte y 73°47'1.65" Longitud Oeste, a una elevación de 2546 msnm. Los variables registradas en la estación fueron: temperatura (°C), temperatura del punto de rocío Td (°C) y humedad relativa (%). Aunque se contó con un registrador automático,



estas estaciones se catalogan como estaciones auxiliares, y aunque no estén homologadas a estándares de la organización meteorológica mundial OMM, cumplen un importante rol en el monitoreo de las condiciones climáticas de la zona, en una escala espacial local.

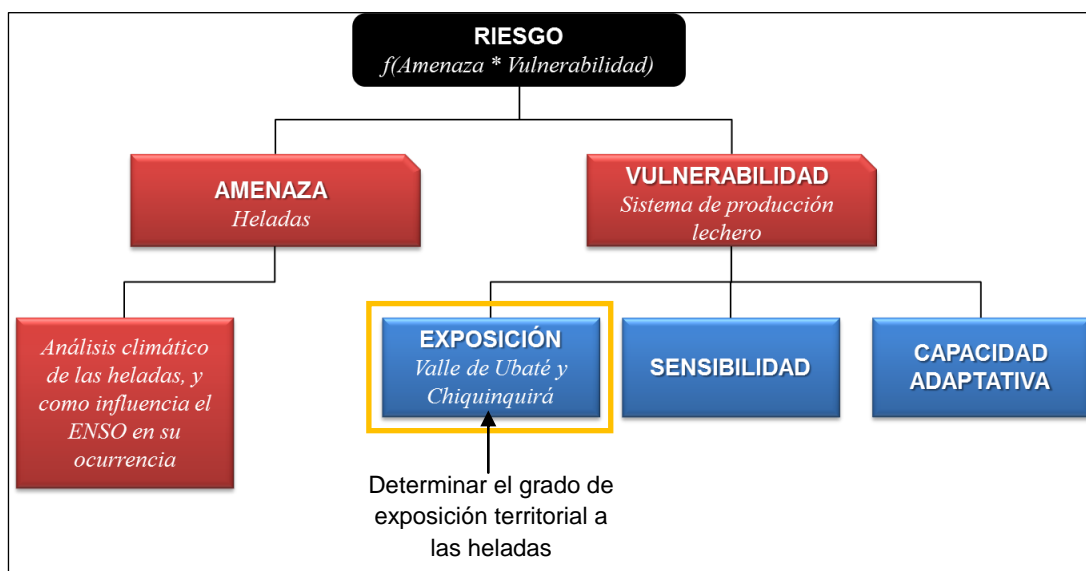
### 3.2.4 Información geográfica

La información geográfica base fue descargada del portal SIGOT del IGAC (IGAC, 2013), cuyo sistema permite obtener la cartografía oficial del país, además de su fácil y amigable manipulación. La información utilizada comprendió los límites departamentales, límites municipales, hidrografía y área de centros poblados. De otro lado se utilizaron los estudios integrados de suelos de los departamentos de Cundinamarca y Boyacá a escala 1:100.000 realizados por el IGAC.

## 3.3 Análisis de exposición territorial a heladas

Para abordar la temática fue necesario examinar el criterio de análisis de riesgo en función del análisis de una amenaza climática (helada) y como ésta impacta en un sistema de producción como lo es el lechero (Figura 3-3)

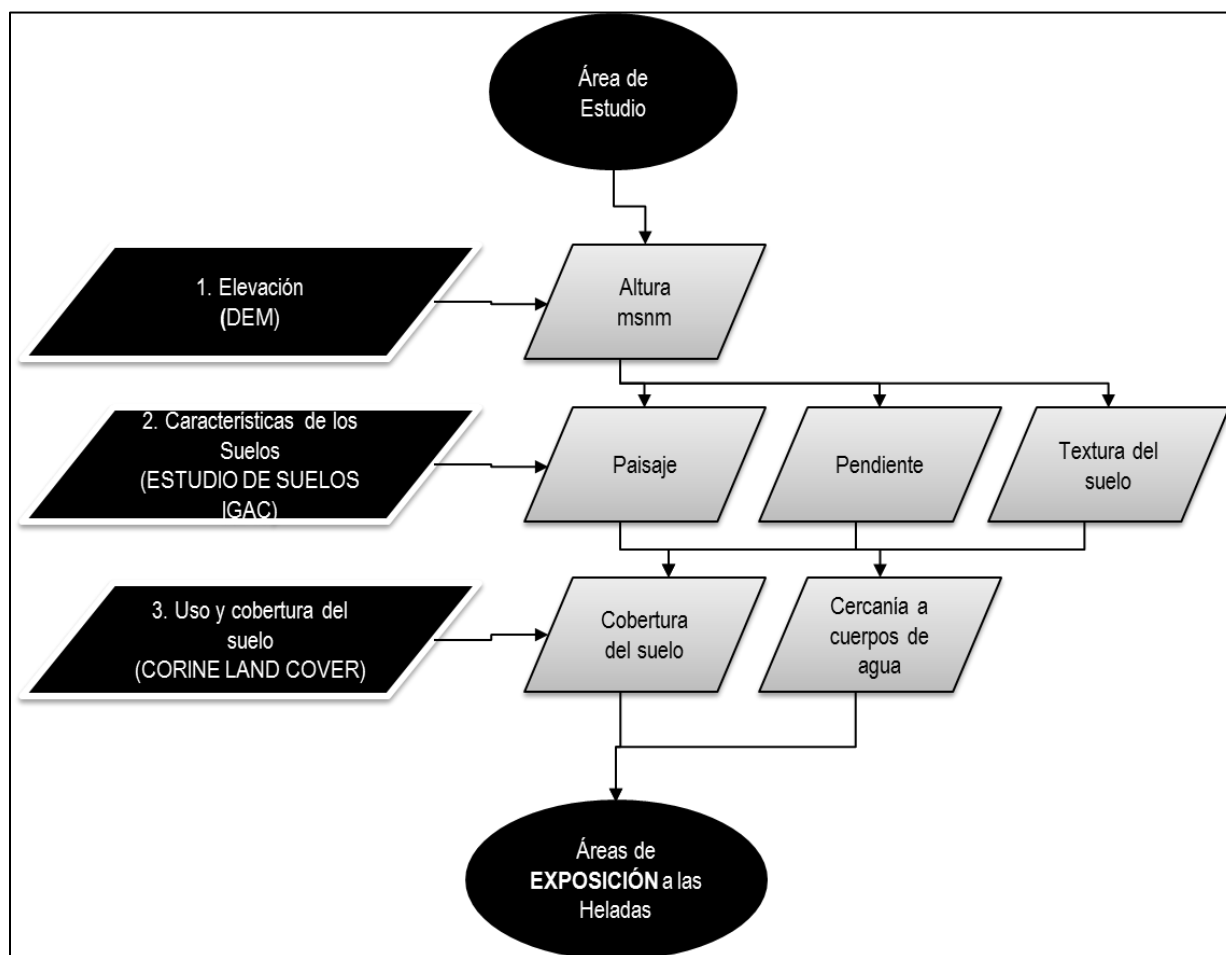
**Figura 3-3:** diagrama conceptual utilizado en el análisis de riesgo, adaptado para heladas (EIRD-ONU, 2004).



El grado de exposición territorial a las heladas se determinó a través de fuentes secundarias de información, específicamente de estudios que mencionaran cuáles variables biofísicas favorecen la ocurrencia de heladas.

Cada variable se categorizó determinando una calificación que reflejara un grado de exposición. Posteriormente se generaron mapas del grado de exposición por variable, calificando con **ALTO/BAJO** las condiciones que indiquen mayor/menor favorecimiento para la ocurrencia de heladas

**Figura 3-4:** diagrama conceptual de las variables biofísicas más importantes en la calificación del grado de exposición territorial a heladas.



Las variables para la categorización son explicadas a continuación (Tabla 3-1):

### 3.3.1 Elevación

Uno de las variables más importantes en el desarrollo y ocurrencia de una helada es la elevación, ya que según el gradiente de temperatura de 6°C por cada 1000 msnm, con 27°C de referencia al nivel del mar, puede llegarse a alturas donde la temperatura mínima desciende tanto que pueden descensos de temperaturas que pueden afectar los sistemas productivos, ya sean pecuarios cómo agrícolas. Las heladas en Colombia, tal como lo menciona el IDEAM, son frecuentes en áreas localizadas a más de 2500 msnm siendo más frecuentes, en los meses secos del año (Mayorga, González, & Hurtado, 2008). La categorización presenta una calificación de **Bajo**, para elevaciones entre 2500 y 2800 msnm, **Moderado** para intervalos entre 2800 y 3000 msnm, y **Alto** para alturas superiores a 3000 msnm; se presume que por debajo de los 2500 msnm no se presentan heladas por lo que la calificación es **Ninguno**.

**Tabla 3-1:** calificación de la susceptibilidad a heladas por variable

Exposición	ELEVACIÓN	CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS			USO Y COBERTURA DEL SUELO	
	Altura msnm.	Paisaje	Pendiente	Textura	Cobertura del Suelo	Distancia a cuerpos de agua
NINGUNO	<2500	Cuerpos de agua	>50%	Cuerpos de agua y otros	Áreas lagunares, urbanas y degradadas	Cuerpos de agua
BAJO	2500-2800	Montaña Estructural	25 – 50%	Fina	Áreas naturales con vegetación arbórea	< 1 Km
MODERADO	2800-3000	Altiplanicie Cundiboyacense	7-25 %	Moderadamente fina y mediana	Mosaicos de áreas agropecuarias y de vegetación arbórea	1 – 2 km
ALTO	3000-3500	Planicie y Valle	<7%	Gruesa	Áreas agropecuarias y otras	> 2 Km

### 3.3.2 Paisajes

Las características paisajísticas del terreno definen en gran medida los lugares de mayor exposición a la formación de heladas por radiación, así que los valles de las cuencas, hondonadas próximas a las montañas y zonas de planicie, altiplanicie y valles ofrecen mayores condiciones para el desarrollo dichos eventos (Huamani, 2005).

La calificación de la exposición se asignó partiendo de las características intrínsecas que tienen los paisajes, por lo que las planicies y valles cuyo relieve es plano a ligeramente ondulado presentan condiciones de mayor exposición a la ocurrencia de heladas, por lo que se le asignó la calificación **Alto**. La altiplanicie Cundiboyacense, compuesta por colinas y lomas fue calificada como grado de exposición **Moderado**, debido principalmente a la formación alargada de sus lomas que hace que tenga pendiente variable, indicando que en algunas de sus zonas puedan tener condiciones para el desarrollo de las heladas. La montaña estructural presenta una composición ondulada a escarpada por lo que son zonas poco expuestas a heladas debido a que son formas diferentes a las planicies y valles, por lo que se le asignó la calificación **Bajo**. Los cuerpos de agua, pantanos, zonas eriales y áreas urbanas fueron calificadas como **Ninguno**, debido a que estas zonas no presentan enfriamientos que permita una configuración del evento extremo.

### 3.3.3 Pendiente

Así como el paisaje es una variable importante para la determinación de zonas expuestas a la ocurrencia de heladas, la pendiente puede determinar éstas de manera más detallada ya que cuantifica la inclinación del terreno, permitiendo generar con más facilidad los rangos de clasificación de la exposición. Los terrenos en ladera y de pendiente suave, son los menos propensos a las heladas y en cambio los valles u hondonadas presentan un mayor número de ellas (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).

**Figura 3-5:** esquema del enfriamiento radiativo nocturno. Fuente: Huamani (2005)



Las pendientes mayores al 50%, clasificadas por el IGAC como moderadamente a fuertemente escarpada, más cuerpos de agua, pantanos, zonas urbanas y eriales fueron descartadas como áreas expuestas a heladas ya que las pendientes inclinadas contribuyen a que el aire más denso se coloque en el fondo del valle, creando una capa o cinturón termal de aire más caliente entre el interior más frío y el aire superior más frío (Huamani, 2005).

Las pendientes ligeramente escarpadas y/o fuertemente quebradas (25% – 50%), fueron calificadas como **bajo**, ya que dichas zonas presentan inclinaciones que resultan poco favorables para que el enfriamiento nocturno desarrolle eventos de heladas. El grado de exposición **moderado** fue asignado a las pendientes entre 7% y 25%, correspondientes a las descripciones: moderadamente inclinada a fuertemente ondulada, ya que estas zonas no presentan pendientes tan fuertes, lo que permite la acumulación del aire más frío sobre esta superficie. Las regiones cuyas pendientes muestran ser más expuestas a las heladas son aquellas clasificadas como plana a ligeramente ondulada (0 – 7%), ya que dichas zonas en su mayoría se conforman de valles y planicies. Estas regiones fueron calificadas grado de exposición **Alto**,

### 3.3.4 Textura del suelo

La textura del suelo indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, tales como la arena, el limo y la arcilla, teniendo que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad del agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa (FAO, 2012).

Por tal razón una textura fina (suelo arcillosos, arcilloso limoso y arcillosos arenoso) contribuye a que la tierra esté más apretada, firme y húmeda, siendo menos expuesta a un enfriamiento más severo, por lo que fue calificada como grado de exposición **Bajo**.

El grado de exposición **Moderado** fue asignado a las texturas moderadamente fina y mediana, compuestas principalmente de suelos: franco limoso arcilloso, franco arenoso arcilloso, franco arcilloso.

La textura gruesa, normalmente turbosa, seca, con poca capacidad de retención de agua, fue calificado como grado de exposición **Alto**, ya que por sus características presentan condiciones favorables a un mayor enfriamiento radiativo en el suelo.

### 3.3.5 Cobertura

Se considera a la cobertura del suelo como una variable de importancia debido a que dicha capa ocupada por la vegetación, entre el suelo y el aire sobrepuesto, puede presentar diferencias de grosor, densidad y altura lo que altera la transferencia de calor desde la superficie hasta la capa de aire y viceversa .

El concepto acogido para realizar la calificación consistió en determinar el tipo de vegetación predominante en la unidad, por lo que si prevalecía la vegetación de gran altura, densidad y grosor, se asumía esta como grado de exposición **Bajo**. Dicha clasificación se compone de: bosque natural denso, arbustos y matorrales, bosque plantado y bosque natural fragmentado.

El grado de exposición **Moderado**, se asignó a unidades cuyas coberturas alternaran entre espacios naturales, pastos y cultivos, por ello las coberturas predominantes fueron: mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, mosaico de pastos y espacios naturales.

La vegetación de páramo y subpáramo (por altura), los pastos limpios, pastos naturales y sabanas, mosaico de pastos y cultivos, pastos enmalezados o enrastrados y los cultivos anuales fueron agrupados en el grado de exposición **Alto**.

### 3.3.6 Cercanía a cuerpos de agua

La cercanía a los grandes cuerpos de agua minimiza el enfriamiento que se produce en la superficie terrestre, evitando así que se desarrolle las heladas. El agua tiene la mayor capacidad calorífica de todas las sustancias en el mundo, por lo que su temperatura muestra tendencia a ser constante, evitando así fuertes fluctuaciones.

Debido a que no se cuentan con estaciones meteorológicas equidistantes a lo largo de cada cuerpo de agua que pudieran constatar tal comportamiento, se decidió a través de

datos teóricos de algunos estudios, tales como: (Fernandez Long & Barnatán, 2011) (Artunduaga, 1980) entre otros, sugerir una distancia aproximada “segura” que pueda actuar como una barrera para evitar un mayor enfriamiento.

Es así que distancias menores a 1 Km del cuerpo de agua se calificaron como grado de exposición **Bajo**, de 1 a 2 Km como **Moderado**, y mayor a 2 Km grado de exposición **Alto**. Es posible que las distancias varíen de acuerdo al área y caudal de agua que tenga el cuerpo, ésta última variable es apreciable en cuerpos de agua en movimiento como ríos, quebradas entre otros, sin embargo en éste ejercicio no se tuvo en cuenta para la calificación.

### 3.3.7 Determinación de las áreas de exposición a las heladas para el valle de Ubaté y Chiquinquirá

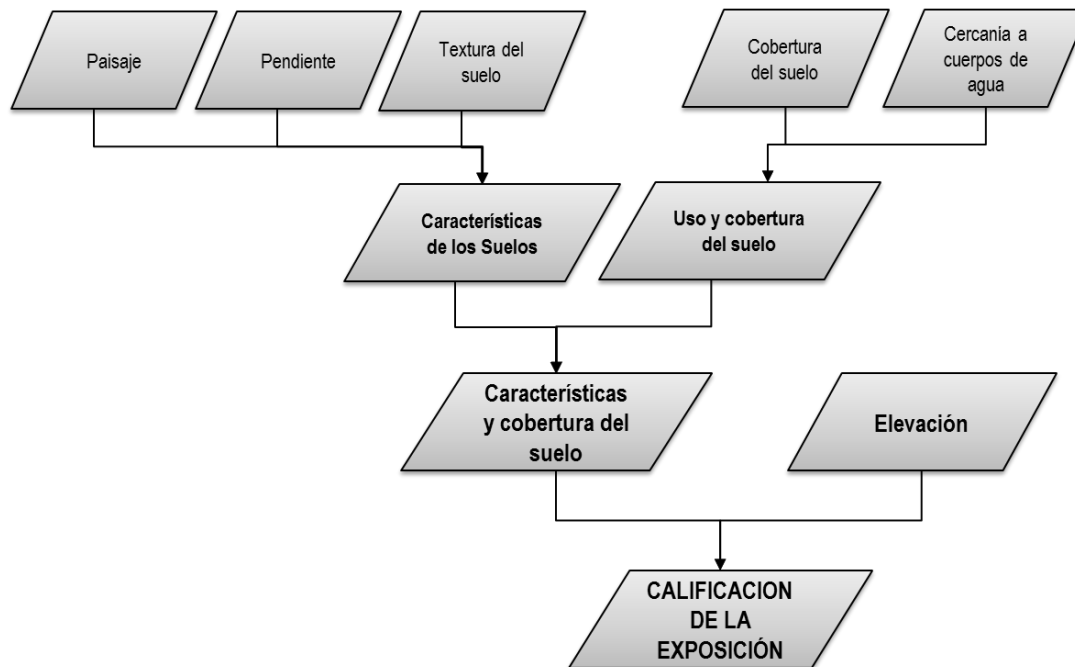
Se realizó la superposición espacial de cada variable a través de la ayuda de un software SIG, determinando nichos espaciales con grado de exposición Alto, Moderado, Bajo y Ninguno.

Como punto de partida se agrupó las variables Pendiente, Paisaje y Textura en una temática denominada **Características de los Suelos**, cobertura del suelo y cercanía a cuerpos de agua en la temática **Uso y Cobertura del Suelo**, y altura sobre el nivel del mar en la temática **Elevación**.

La determinación de calificación se realizó a través de la agrupación de las temáticas: Características de los suelos y Uso y cobertura de los suelos, cuyo resultado se relacionó con la Elevación, considerada como la variable de mayor peso en el análisis.

El resultado de la calificación determina las áreas con los grados de exposición territorial a las heladas.

La **Figura 3-6** muestra el proceso metodológico para la determinación del grado de exposición y la **Tabla 3-2** muestra el resultado de la calificación.

**Figura 3-6:** jerarquía para la realización de la calificación de grado de exposición a las heladas**Tabla 3-2:** calificación de la susceptibilidad a heladas por variable determinando nichos espaciales

ELEVACIÓN	CARACTERÍSTICAS + USO Y COBERTURA	GRADO DE EXPOSICIÓN
ALTO	ALTO	ALTO
ALTO	MODERADO	ALTO
ALTO	BAJO	MODERADO
ALTO	NINGUNO	MODERADO
MODERADO	ALTO	ALTO
MODERADO	MODERADO	MODERADO
MODERADO	BAJO	MODERADO
MODERADO	NINGUNO	BAJO
BAJO	ALTO	MODERADO
BAJO	MODERADO	MODERADO
BAJO	BAJO	BAJO
BAJO	NINGUNO	BAJO
NINGUNO	ALTO	NINGUNO
NINGUNO	MODERADO	NINGUNO
NINGUNO	BAJO	NINGUNO
NINGUNO	NINGUNO	NINGUNO

Las áreas determinadas reflejan el grado de exposición territorial de la zona a la ocurrencia de heladas, a una escala cartográfica general (1:100.000), lo cual imposibilita la discriminación de los tipos de cultivos.



### 3.4 Análisis de variabilidad climática

Para el análisis de variabilidad climática, aparte de utilizar los datos de las estaciones meteorológicas se utilizaron los siguientes materiales y métodos.

#### 3.4.1 Relación de las variables océano – atmosféricas con variables climáticas

Para establecer el índice oceánico, atmosférico u océano – atmosférico de mayor influencia sobre el comportamiento de las variables climáticas en la zona de estudio, se utilizó el análisis de regresión lineal y correlaciones de Pearson entre los índices descritos en el numeral 3.2.2 (TSM, Índice ONI e Índice MEI), y las variables climáticas mencionadas en el numeral 3.2.1 (precipitación, temperatura, humedad relativa y brillo solar)

Una vez seleccionado el índice, se determinó el grado de afectación de éstos sobre las variables meteorológicas utilizando el método de análisis compuesto (AC). El AC es una técnica de muestreo, basada en tablas de contingencia, que busca la probabilidad condicional de ocurrencia de un evento y su posible relación con la alteración de la variable climática en alguna estación meteorológica (NOAA, 2011). El AC permite evaluar la frecuencia climatológica que relaciona una variable meteorológica local y eventos de variabilidad climática de mayor escala (Ejemplo: Fenómenos “El Niño” y “La Niña”).

#### 3.4.2 Coeficiente de correlación de Pearson

La correlación entre dos variables refleja el grado en que las puntuaciones están asociadas. La formulación clásica, conocida como correlación producto momento de Pearson, se simboliza por la letra griega rho ( $\rho_{xy}$ ) cuando ha sido calculada en la población. Si se obtiene sobre una muestra, se designa por la letra " $r_{xy}$ ". Este tipo de estadístico puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables si ambas utilizan una escala de medida a nivel de intervalo/razón (variables cuantitativas). (Universidad de Oviedo, 2013)

La fórmula suele aparecer expresada como:

$$r_{xy} = \frac{\hat{s}_{xy}}{\hat{s}_x \hat{s}_y} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_{xi} Z_{yi}}{n-1} \quad (3.1)$$

- La primera expresión se resuelve utilizando la covarianza y las desviaciones típicas de las dos variables (en su forma insesgada).

- La segunda forma se utiliza cuando partimos de las puntuaciones típicas empíricas.

Este estadístico, refleja el grado de relación lineal que existe entre dos variables. El resultado numérico fluctúa entre los rangos de +1 a -1.

- Una correlación de +1 significa que existe una relación lineal directa perfecta (positiva) entre las dos variables. Es decir, las puntuaciones bajas de la primera variable (X) se asocian con las puntuaciones bajas de la segunda variable (Y), mientras las puntuaciones altas de X se asocian con los valores altos de la variable Y.
- Una correlación de -1 significa que existe una relación lineal inversa perfecta (negativa) entre las dos variables. Lo que significa que las puntuaciones bajas en X se asocian con los valores altos en Y, mientras las puntuaciones altas en X se asocian con los valores bajos en Y.
- Una correlación de 0 se interpreta como la no existencia de una relación lineal entre las dos variables estudiadas. (Universidad de Oviedo, 2013)

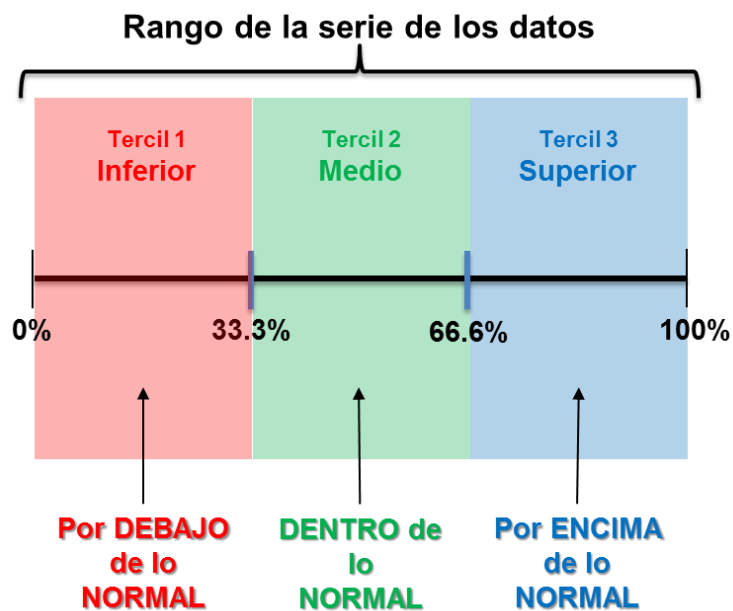
### 3.4.3 Análisis compuesto

Establecidas las temporadas lluviosas y secas y el índice oceánico de mayor influencia sobre las variables meteorológicas, se determinó la relación entre los eventos ENSO (fenómenos “El Niño” y “La Niña”) y la variabilidad en los patrones de las diferentes variables meteorológicas utilizando AC.

Para realizar el AC, se obtuvo un nuevo valor de anomalía del índice en los episodios “La Niña”, “El Niño” y “Neutro” generando promedios ponderados de cada variable climática por trimestre en las temporadas lluviosas y secas.

Una vez identificado los respectivos valores de las variables climáticas por trimestre en los eventos “La Niña”, “El Niño” y Neutro, bajo influencia del índice, se establecieron tres escenarios para los valores de cada evento, con base en estadísticas de terciles (NOAA, 2011). Un tercil fácilmente puede ser comprendido como una medida de posición no central que permite conocer puntos característicos de una distribución de probabilidad, dividiendo la serie de datos en tres partes. Un tercil se calcula organizando la serie de datos de menor a mayor, donde a continuación se ubica el 33,3% de los datos denominándose como tercil inferior o tercil 1. Posteriormente se ubica en el 66.6% de los datos siendo el límite superior del tercil medio o tercil 2 (Figura 3-7).

**Figura 3-7:** consideración de los terciles en una serie de datos.



- El tercil inferior o tercil 1: define la categoría de la variable analizada con valores “por debajo de lo normal”
- El tercil medio o tercil 2: define la categoría de la variable analizada que registra valores en el rango “normal”
- El tercil superior o tercil 3: define la categoría de la variable analizada con valores “por encima de lo normal”

Las probabilidades de ocurrencia de cada evento “El Niño”, “La Niña” y Neutro, definidos con base en los terciles, se calcularon mediante una tabla de probabilidad o tabla de contingencia. Una vez obtenidos éstos valores y con el objeto de saber la relación entre los eventos ENSO y los valores de las variables climáticas, se aplicó la prueba  $\chi^2$  de independencia para tablas de contingencia, en donde:

$H_0$ : la probabilidad de ocurrencia de la variable de interés es independiente de los eventos ENSO

$H_a$ : la probabilidad de ocurrencia de la variable de interés es dependiente de los ENSO

### 3.4.4 Interpolación espacial

Para la representación espacial de las probabilidades de ocurrencia de cada variable analizada se utilizó el método no Geoestadístico (determinístico) de la distancia inversa ponderada (IDW: Inverse Distance Weight) que promedia los valores de acuerdo al valor de las observaciones y los pondera de acuerdo con las distancias del lugar a interpolar.

La formulación se encuentra dada por:

$$w(s_i) = ||s_i - s_0||^{-p}, \quad (3.2)$$

$$\hat{Z}(s_0) = \frac{\sum_{i=1}^n w(s_i)Z(s_i)}{\sum_{i=1}^n w(s_i)}, \quad (3.3)$$

Donde  $||...||$ , indica la distancia euclidiana y  $-p$  un peso de la distancia inversa ponderada que por defecto siempre será de valor 2. Si  $s_0$  es la localización de una observación, el valor es retornado como un peso ponderado infinito.

El peso de la distancia inversa  $-p$ , determina en qué grado el punto más cercano es el de mayor influencia con respecto a otros puntos circundantes por el modelo (Bivand, Pebesma, & Gómez-Rubio, 2008).

## 3.5 Caracterización y pronóstico de heladas

### 3.5.1 Caracterización de heladas

El término caracterización significa, en otras palabras, la descripción del régimen de heladas por medio de información estadística (Fernandez Long & Barnatán, 2011). En general, la caracterización agroclimática de las heladas se realiza por medio de los siguientes parámetros:

- **Época de ocurrencia:** se refiere a la época del año donde se presenta mayor número de descensos de temperatura o heladas.

Para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de las heladas se utilizó la definición empírica o a posteriori que se basa en una fase de experimentación y de recopilación de datos. Para la estimación de la probabilidad  $p = f_r(E) = f(E) = \frac{r}{n}$  se efectúa un experimento  $n$  veces donde el evento ( $A$ ) ocurre  $r$  veces, a partir de lo cual se estima la frecuencia relativa del evento:

$$p = f_r(E) = f(E) = \frac{r}{n} \quad (3.4)$$

- **Intensidad:** la caracterización de la intensidad de las heladas se realiza utilizando la temperatura más baja registrada en el año, variable denominada temperatura mínima absoluta (Fernandez Long & Barnatán, 2011). Para determinar la intensidad de las heladas se ajustó la curva de distribución de Gumbel, la cual se utiliza para analizar frecuencias de valores extremos de los valores máximos o mínimos de caudales, precipitaciones y temperaturas entre otros. La función requiere una serie de datos históricos continuos, lo que lleva a eliminar estaciones en las que faltan datos (Gutierrez Lozano , y otros, 2011).

La función de probabilidad de Gumbel se define de la siguiente manera (Ojo, 2001):

$$F(X) = e^{-e^{-y}} \quad (3.5)$$

Dónde:

$$y = \beta(X - U) \quad (3.6)$$

Siendo  $\beta$  y  $U$  parámetros de la función, los cuales son calculados de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{1}{0,779696 * \sigma} \quad (3.7)$$

$$U = \bar{x} - 0,450047 * \sigma \quad (3.8)$$

Donde  $\sigma$  y  $\bar{x}$  son la desviación estándar y la media de la serie de datos.

Para comprobar la significancia estadística de los datos se utilizó la “prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov”, usualmente aplicada en estos estudios (Gutierrez Lozano , y otros, 2011).

- **Duración:** la duración de las heladas se expresa a través del número de horas en que la temperatura permanece por debajo del valor de temperatura que determina el enfriamiento o la helada.
- **Tipo de helada:** Los distintos tipos de heladas, constituyen también una información de relevancia en la elección de los métodos de lucha a aplicar cuando se encara la planificación de la lucha contra éste fenómeno (Fernandez Long & Barnatán, 2011). Para éste caso se consultó información secundaria para determina el tipo de helada.

### 3.5.2 Pronóstico de las heladas.

El pronóstico de heladas implica determinar con antelación el evento; para el valle de Ubaté y Chiquinquirá se debió encontrar una metodología en la cual los mismos productores pudieran a partir de unas variables climáticas de entrada determinar el evento a escala local.

Para el pronóstico local de las heladas se utilizó el método de Allen (1957), el cual utiliza registros históricos de la temperatura del aire y del punto de rocío a las dos horas después de la puesta de Sol y la temperatura mínima observada durante las noches de heladas con el cielo despejado y en calma para desarrollar los coeficientes de regresión necesarios para predecir la temperatura mínima durante un periodo en particular del año. Dos horas después de la puesta de Sol es el tiempo de partida ( $t_0$ ) para el modelo. Este tiempo corresponde al momento en que la radiación neta ha alcanzado el valor más

negativo. Si se asume que durante la noche la cobertura por nubes o por niebla es pequeña o nula, la radiación neta cambia poco desde el momento ( $t_0$ ) hasta la salida del Sol la mañana siguiente (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

El modelo desarrollado por Allen (1957) es presentado como un sustento para la predicción cuantitativa de heladas de radiación. La ecuación expresa la temperatura mínima como una función de los datos higrométricos nocturnos de la superficie. Muchas ecuaciones han sido desarrolladas empíricamente para la aplicación en sitios específicos, porque la pérdida neta de calor de la superficie en la noche depende de la radiación compleja y los procesos de conducción de calor, pero la debilidad de cualquier ecuación empírica basada en datos de superficie es la presunción que los valores promedio de diferentes parámetros físicos pueden estar concentrados como coeficientes en dicha ecuación (Allen, 1957).

Como punto de partida Allen (1957) adaptó la fórmula de pronóstico de Young (1920), desarrollada en el condado de Orange Belt al sur del valle de San Joaquin California, cuyo error no superaba  $\pm 3^\circ\text{F}$

$$T_m = D - \left( \frac{H-30}{4} \right) + v + v' \quad (3.9)$$

Donde:

$T_m$ : Indica la temperatura mínima

$D$  : Indica el punto de rocío (4:45 P.M. – Hora Local)

$H$  : es el porcentaje de humedad relativa (4:45 P.M. – Hora Local)

$v$  y  $v'$ : son variables de corrección en función de  $D$  y  $H$

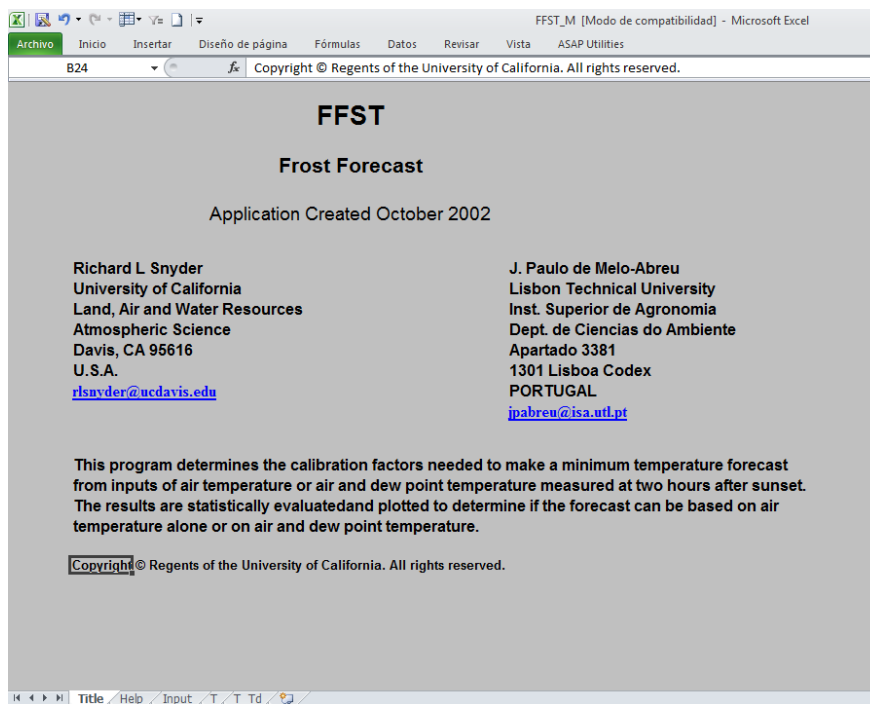
La tarea de Allen (1957) consistió en llevar la formulación de Young (1920) a términos sólo de temperatura del aire o bulbo seco  $T_d$  y temperatura de bulbo húmedo  $T_w$ , debido a que estos parámetros son directamente observados, mientras la temperatura de punto de rocío y la humedad deben ser calculadas a partir de tablas psicométricas. La ecuación resultante de la generalización realizada por Allen fue la siguiente:

$$T_m = T_w - \frac{1}{4}(T_d + 16) \quad (3.10)$$

La simplificación de la ecuación tiene dos ventajas: no es necesario la consulta de tablas de punto de rocío y humedad relativa y la temperatura mínima puede ser calculada de forma rápida cuando se conocen los dos parámetros.

Según Bagdonas *et al.* (1978) recomiendan utilizar modelos de predicción que utilicen factores meteorológicas locales y datos climáticos específicos del lugar ya que estos proporcionan los mejores resultados, debido principalmente a lo descrito por Kalma *et al.* (1992) donde explica que los modelos a escala micrometeorológica no predicen satisfactoriamente la temperatura del aire a partir de los balances de energía, sino con una serie de variables tales como los perfiles verticales de viento, humedad y temperatura que son de difícil medición. Según Sanabria *et al.* (2006) al realizar la calibración de tres modelos (Cellier y Lhomme de tipo físico y García una variante de Allen) mostró mayores correlaciones con lo medido en campo en el Valle del Mantaro (Perú), considerando que a nivel de caseta los modelos de tipo empírico brindan mejores resultados.

**Figura 3-8:** aplicación creada por Snyder & Melo-Abreu (2010) llamada FFST (Frost Forecast), basada en el modelo de Allen (1957) para el pronóstico de heladas a escala local.





Recientemente el modelo de Allen fue utilizado por un sistema de alerta llamado Innoamb para el monitoreo de cultivo de kiwi (*Actinidia deliciosa*) en la provincia de Pontevedra (España), el cual es calibrado a partir de registros históricos de temperatura del aire, generando alertas que permiten detectar en tiempo real temperaturas críticas para el cultivo (Lamas, y otros, 2013).

La FAO creó un aplicativo informático en el software Excel llamado FFST.xls (Frost Forecast), basado en el modelo empírico propuesto por Allen (1957), de fácil calibración en condiciones locales, siempre que se alimente con información de noches de heladas de radiación.

Para utilizar FFST se necesita conocer los datos de temperatura de bulbo seco y de punto de rocío dos horas después de la puesta del sol, debido que en ésta hora la radiación neta alcanza valor el valor más bajo, tornándose negativa, por lo que a nivel del suelo comienza un enfriamiento progresivo. El ajuste del modelo depende del número de observaciones con que se cuente, equivalente al número de eventos de helada ocurridos, ya que unos coeficientes de regresión debidamente ajustados proporcionan unos mejores valores de temperatura predicha (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

De la misma forma, la utilización del FFST en el pronóstico de heladas, a una escala local (finca), implica que por parte de los productores del sistema de producción lechero en el valle de Ubaté y Chiquinquirá

### **3.6 Evaluación de sensibilidad del sistema de producción lechero a las heladas, a través de modelos de simulación**

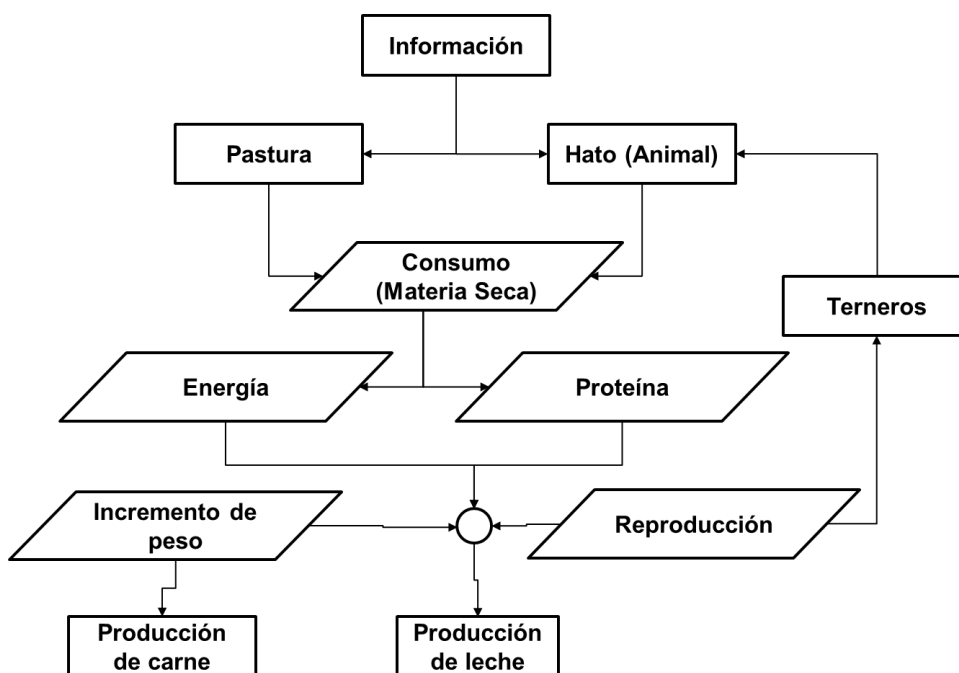
Para entender la sensibilidad del sistema de producción a la ocurrencia de eventos climáticos extremos, y para fines de ésta investigación que es cuantificar como las heladas afectan la producción de leche, se realizó en primer lugar una caracterización del sistema en la zona, para finalizar con la utilización de modelos de simulación los cuales son contruidos con un objetivo específico y deben ser considerados como un medio; estos se orientan hacia el campo de la investigación, posibilitando detectar escenarios o alternativas del mejor uso de los recursos (León-Laverde, Arce, & Quiroz, 1997).

Para establecer que elementos del sistema de producción lechero son sensibles a las heladas se utilizó el modelo propuesto por Aguilar *et al.* (2004), el cual considera que el bovino se encuentra a la intemperie considerando factores medio ambientales y no toma el sistema de pastoreo (sólo tiene en cuenta calidad del forraje), por lo que estima el consumo voluntario y el balance de energía metabolizable. Esto es ventajoso debido a que no se requieren una gran cantidad de variables que puede dificultar la calibración y posterior resultado de modo que con unos pocos datos de entrada se puede conocer la tendencia de cómo es afectada la producción de leche ante un evento climático extremo como una helada (Arce, 2013).

### 3.6.1 Caracterización del sistema de producción lechero

Los sistemas de producción de leche son complejos ya que intervienen variables interrelacionadas entre sí, éstos se componen de factores biológicos y socioeconómicos, los cuales usualmente son investigados de forma separada. Sin embargo, León-Laverde *et al.* (1997) propone un esquema en el cual la producción animal es representada por un modelo simple y sencillo compuesto por dos componentes físicos o tangibles: el hato (animal) y pastos (Figura 3-9) y por cuatro componentes no físicos.

**Figura 3-9:** representación esquemática de los componentes y elementos de un sistema de producción animal. (León-Laverde, Arce, & Quiroz, 1997)



Los componentes no físicos, definidos como aspectos relevantes para el desarrollo del sistema productivo, están compuestos por: alimentación (nutrición), que se refiere a al componente físico “Pasto” formado por los forrajes con complemento de subproductos, residuos de cosecha y concentrados; genética, que en sí es el componente animal; sanidad, el cual incluye las enfermedades más comunes; reproducción, que es un elemento natural en el hato; y economía que se refiere a los aspectos sobre costo-beneficio. Para el caso de la caracterización y la modelación, y dado uno de los objetivos de la investigación que es establecer que elementos del sistema de producción lechero son sensibles a la ocurrencia de heladas, se consideró que los componentes físicos son los que están afectados por variables exógenas (climáticas) al sistema por lo que la recolección de información fue enfocada hacia dicho fin. A continuación se hace una breve descripción a dichos componentes según León-Laverde *et al.* (1997):

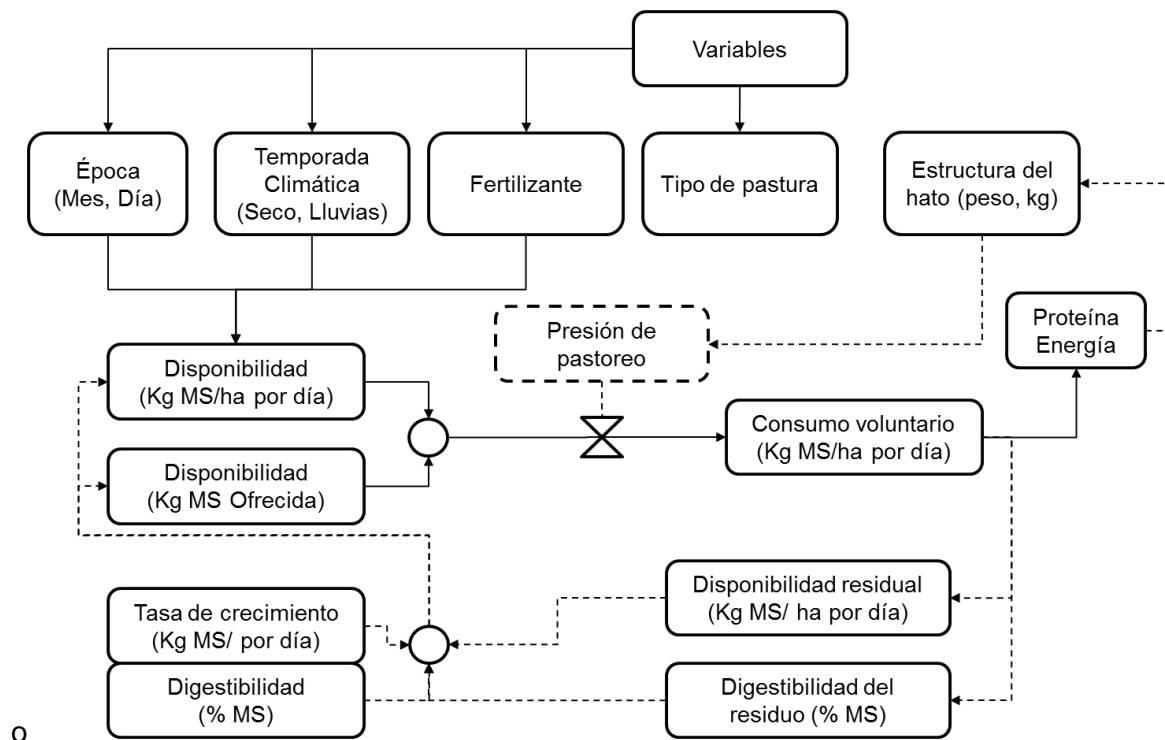
- **Componente animal:** constituye la unidad dinámica y básica de transformación y producción, que para el caso de la modelación debe presentar todos los atributos necesarios en relación entradas(alimentación)/salidas(producción de leche). Entre los atributos básicos en el caso concreto de hato lechero se consideran: el peso, la edad, estado de lactancia, días de preñez y número de lactancia. Es importante resaltar que cada unidad animal tiene su propia curva de lactancia, relacionada con los requerimientos nutritivos y estado fisiológico considerado en el componente de alimentación
- **Componente alimentación:** se integran los requerimientos del animal y la forma de alimentación, que incluye las diversas combinaciones de recursos forrajeros: pastos-forraje, subproductos y residuos de cosecha, así como la suplementación con concentrados. Para fines de ésta investigación sólo se tiene en cuenta la materia seca (MS) consumida por el animal, sólo en términos del pasto, dejando de lado cualquier otro tipo de alimento para con ello facilitar la modelación. La relación de consumo varía según la característica del animal (raza, ración entre otros)La alimentación en sí, es la entrada principal para obtener los nutrimentos de energía y proteína lo constituye el consumo de MS, por lo que ésta debe tener una densidad calórica y proteica que cubra los requerimientos de manutención, reproducción, producción y mantenimiento.

- Consumo de energía: la energía de requerimiento es comparada con la necesaria para obtener los niveles de producción y crecimiento (cambios de peso)
- Consumo de proteína: la cantidad de proteína en el alimento puede tener efectos positivos, como negativos; si el balance es negativo, el animal pierde peso, pero si es positivo el animal lo transforma en remanente de energía, eliminándose en forma de úrea.

### 3.6.2 Modelación del sistema de producción.

Para la modelación del sistema de producción se partió del análisis del ciclo de natural y productivo, que es el paso más simple para la cuantificación de los eventos biológicos del animal. El ciclo de vida es variable y depende mucho del sistema, por lo que se requiere información de consumo, ganancia de peso, curva de lactancia e información que debe ser cuantificada, por lo que para iniciar un modelo de simulación es necesario conocer las relaciones causa – efecto que afectan positiva o negativamente la producción (León-Laverde, Arce, & Quiroz, 1997).

**Figura 3-10:** esquema del efecto de variables exógenas en el consumo de materia seca al pastoreo (León-Laverde, Arce, & Quiroz, 1997)

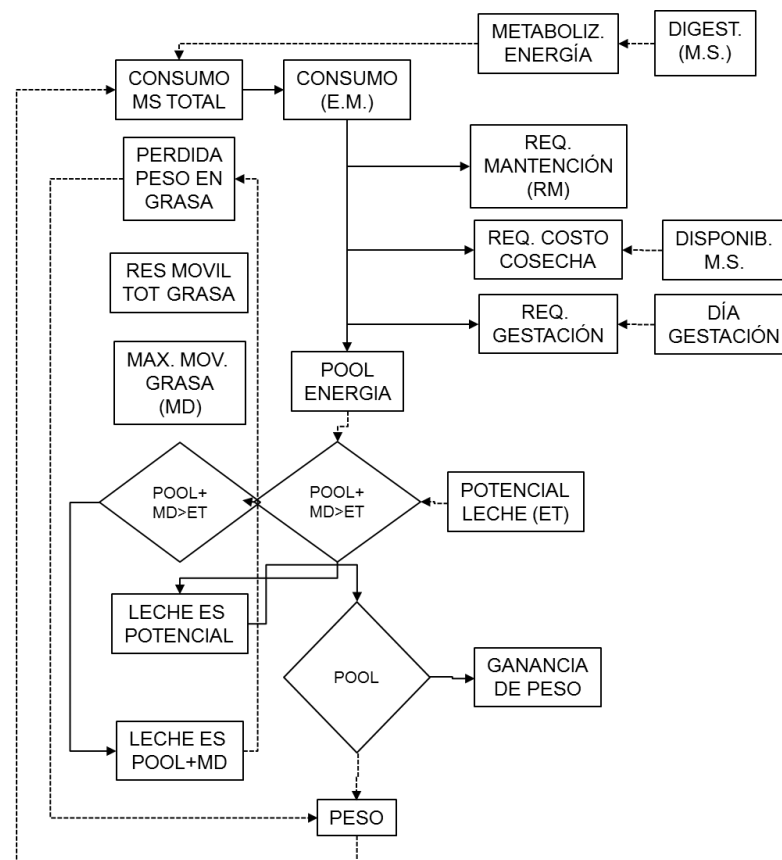


- **Modelo de simulación de Aguilar y otros**

El propósito del modelo es considerar la síntesis de leche como el propósito central, por lo que se considera al bovino como un simple vehículo que permite llegar a cumplir tal meta, considerando sólo la vaca en producción para hacerlo más simple.

La producción de leche de la vaca es considerada como una combinación de múltiples factores como la alimentación, el manejo, medio ambiente, entre otros, envolviéndolos en un ciclo productivo regulado por una serie de mecanismos. Para los efectos de éste modelo sólo se permite animales en lactancia máximo hasta 305 días, por lo que sí existe algún tipo de restricción de energía de calcio o fósforo, éste se detiene para reportar dicha anomalía (Aguilar González, Allende Vargas, & Morales Juregui, 2004).

**Figura 3-11:** diagrama de partición de energía utilizado por el modelo de producción de leche (Aguilar González, Allende Vargas, & Morales Juregui, 2004).



- **Consumo:** éste ítem se encuentra muy ligado a la producción potencial de leche, cuyo periodo de lactancia provoca un aumento considerable del consumo de alimento, aumentando su peso (dejando de lado elementos como alimentos nutricionales que marcan diferencia en el consumo autónomo del animal), aportando a la deducción de la producción de leche como un insumo a dicho cálculo (Aguilar González, Allende Vargas, & Morales Juregui, 2004).
- **Producción potencial de leche y curva de lactancia:** se refiere a la capacidad máxima que tiene una vaca de producir un máximo de leche, alimentado de una manera que satisfaga sus requerimientos. Éste término es fundamental para establecer relaciones insumo – producto, con fines de producción de rendimiento de leche frente a cambios de suministro de alimentos (Aguilar González, Allende Vargas, & Morales Juregui, 2004). Con el objetivo de establecer la curva de lactancia se utilizó el modelo de gamma incompleta propuesto por Wood (1967), la cual es una función que puede ser linealizada fácilmente de modo que la estimación de los parámetros se hace a partir de una regresión no lineal (Ossa S., Torregroza S., & Alvarado, 1997). La representación matemática de dicha ecuación se encuentra dada por :

$$Y_t = a * t^b e^{-ct} \quad (3.11)$$

Donde:

$Y_t$  : Rendimiento de la leche (producción potencial)

$a$  : Parámetro para el nivel de producción (Constante)

$t$  : Día de lactancia

$b$ : Tasa de incremento de la curva (Parámetro de aumento de producción)

$c$ : Tasa de decrecimiento de la curva (Tasa de descenso después de alcanzar el pico de producción)

- **Partición de la energía:** es necesario que para cualquier ejercicio de modelación se deba tener en cuenta los nutrientes que alimenten al animal, dentro de los más importantes están la energía, proteínas, minerales y vitaminas. El contenido nutricional del alimento se traduce en la producción del animal, si éste es de mala calidad, ello se verá reflejado en la producción ya que no se cubrirá los

requerimientos nutricionales del animal (Aguilar González, Allende Vargas, & Morales Juregui, 2004).

### 3.6.3 Datos de entrada para el modelo de simulación del sistema de producción lechero

Los datos de entrada al modelo pueden separarse en tres categorías: la fisiología del animal, las variables climáticas y el alimento o contenido nutricional del alimento.

La fisiología del animal tiene que ver con todos aquellos factores del animal que pueden incidir en la producción de leche, estas varían por especie y raza del animal, ya que cada uno tiene un potencial productivo diferente.

**Tabla 3-3:** datos de entrada al modelo de producción de leche

DATO	UNIDAD	ABV. Modelo	DESCRIPCION
<b>Fisiología del animal</b>			
Peso promedio	Kg	<b>peso</b>	Se refiere al peso del bovino
Día de lactancia del animal	Día	<b>nlac</b>	Día de producción del animal. Se ajustó para la raza holstein en el valle de Ubaté y Chiquinquirá
Potencial productivo del animal	Kg/Lactancia	<b>pot</b>	Producción de leche del animal en todo el periodo de lactancia
Largo pelo del animal	mm	<b>gr</b>	Longitud del pelo del animal
Radio del animal	mm	<b>rd</b>	
<b>Variables Climáticas</b>			
Temperatura mínima	°C	<b>tmin</b>	Valor diario y/o promedio mensual
Temperatura máxima	°C	<b>tmax</b>	Valor diario y/o promedio mensual
Velocidad del viento	Km/h	<b>v</b>	Valor diario y/o promedio mensual
<b>Alimento</b>			
Concentración calorífica del forraje <i>Energía Metabolizable (EM)</i>	Mcal/Kg MS	<b>dc</b>	Correspondiente al valor energético que puede contener el forraje
Contenido de fosforo del alimento	gr/Kg MS	<b>p</b>	Contenido mineral del forraje
Contenido de calcio alimento	gr/Kg MS	<b>Ca</b>	

Por ser animales cuya producción se da a la intemperie algunas variables climáticas como la temperatura y la velocidad del viento pueden intervenir en el rendimiento de

leche, ya que por condiciones climáticas extremas pueden generar algún tipo de desequilibrio energético del animal.

Finalmente las condiciones del alimento, en especial la concentración energética del forraje medida a partir de la digestibilidad y contenido de proteína varía de acuerdo al forraje y a la época climática.

### 3.6.4 Recolección de datos para la evaluación de la sensibilidad

Se realizó una recolección de información en 8 fincas (**Tabla 3-4**) en plena producción lechera, recogiendo aspectos importantes, principalmente para la caracterización del sistema de producción (raza del bovino, producción diaria, tipo hato, carga animal) y para el desarrollo y validación de la simulación.

**Tabla 3-4:** fincas a las cuales se realizó el muestreo (entrevista)

Finca	Vereda	Municipio	Área de la finca (Ha)	Tipo de productor
Oscar García	Peña Blanca	San Miguel de Sema	1 - 5	Pequeño
El Recuerdo	Arboledas	Chiquinquirá	1 - 5	Pequeño
Palmitas El Moral	Peña Blanca	San Miguel de Sema	1 - 5	Pequeño
Mata redonda	Balsa arriba	Chiquinquirá	1 - 5	Pequeño
Chizo	Arboledas	Chiquinquirá	10 - 20	Mediano
El Lago	Hato Viejo	San Miguel de Sema	20 - 50	Mediano
Miramar	El Charquito	San Miguel de Sema	> 50	Grande
Potossi	Sabaneca	San Miguel de Sema	> 50	Grande

El muestreo realizado consistió en uno de tipo no probabilístico (a juicio del investigador) en el que a partir de una serie de requerimientos de información para la evaluación de la sensibilidad, se obtuvo información relevante para la descripción general del sistema de producción.

Por otro lado los valores para el componente de alimentación se adquirieron a partir de la consulta de literatura secundaria, tomando estudios de (Laredo, 1986), (Laredo & Cuesta



Peralta, 1988), (Laredo & Mendoza, 1983) y (Laredo & Mendoza, 1982), quien para el valle de Ubaté y Chiquinquirá estimó el contenido nutricional y proteínico de los pastos de mayor relevancia en la zona.

### **3.6.5 Técnica de muestreo para la recolección de la información**

La entrevista en sí se considera como un mecanismo de aproximación que permite realizar una profundización sobre un determinado proceso, grupo, situación entre otros; es importante contar con unas guías de conversación donde se delimitan unos temas por tratar. En general pueden tratarse asuntos surgidos de la interacción con el entrevistado, lo cual es viable siempre cuando estos temas no se aparten del objetivo principal de la conversación. (PIUPC-UNAL, 2013)

Para la aplicación de la entrevista se tuvo en cuenta la metodología nombrada por Alvarez García (2001)

- Determinación de la población: objeto o campo de estudio, pueden ser personas, cosas, instituciones, ideas, teorías, áreas y conglomerados. Para éste caso la población considerada son todos aquellos ganaderos productores de leche.
- Delimitación de la población: consiste en agrupar los elementos que la conforman de acuerdo a sus características iguales o similares para convertir una población heterogénea a una población homogénea. La delimitación de la población correspondió a identificar productores grandes, medianos y pequeños de leche en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá.
- Tipo de dato: información recogida durante el desarrollo de la investigación. Se recolectó información concerniente al manejo de las heladas.
- Selección de la muestra: existen dos tipos de muestreo uno de tipo probabilístico el cual corresponde a obtener elementos de muestra de la población al azar, y otro de tipo NO probabilístico el cual interviene el criterio, juicio, conveniencia y decisión de personas para elegir los elementos, en otras palabras, es una

selección subjetiva y por lo tanto los miembros de la población no tiene la misma probabilidad de ser elegidos para formar parte de la muestra. Para éste caso se realizó un muestreo a conveniencia del investigador donde se extrajeran características principales de la población; para cumplir dicho objetivo fue necesario indagar a grandes, medianos y pequeños ganaderos productores de leche, agremiados y no agremiados. En total fueron ocho entrevistas debido a que con anterioridad en talleres realizados en el marco del proyecto “Zonificación del impacto de la oscilación ENSO sobre las condiciones climáticas del altiplano Cundiboyacense como base para orientar la generación de transferencia de tecnología agropecuaria y reducir la vulnerabilidad climática” convenio Corpoica-Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (Corpoica, 2012), se identificaron ciertos informantes claves que se mostraron receptivos para la aplicación de la entrevista.

### **3.7 Medidas de control y manejo en el sistema de producción lechero a las heladas**

Al igual que para la evaluación de la sensibilidad, para evaluar las medidas de control y manejo en el sistema de producción lechero se realizó un muestreo no probabilístico (muestreo a juicio del investigador) con el objetivo de identificar las características principales en el control y manejo del sistema de producción lechero ante una helada. Para dicho fin se aplicaron ocho entrevistas a productores y ganaderos de leche de la zona cuyas características se pueden consultar en la Tabla 3-4.

## **4.Resultados y discusión**

### **4.1 Caracterización climática de la zona**

A continuación se presentan los resultados del análisis climatológico del altiplano Cundiboyacense, para las variables precipitación y temperatura (máxima, media y mínima); el análisis de las demás variables como humedad relativa y brillo solar se pueden consultar en el anexo D.

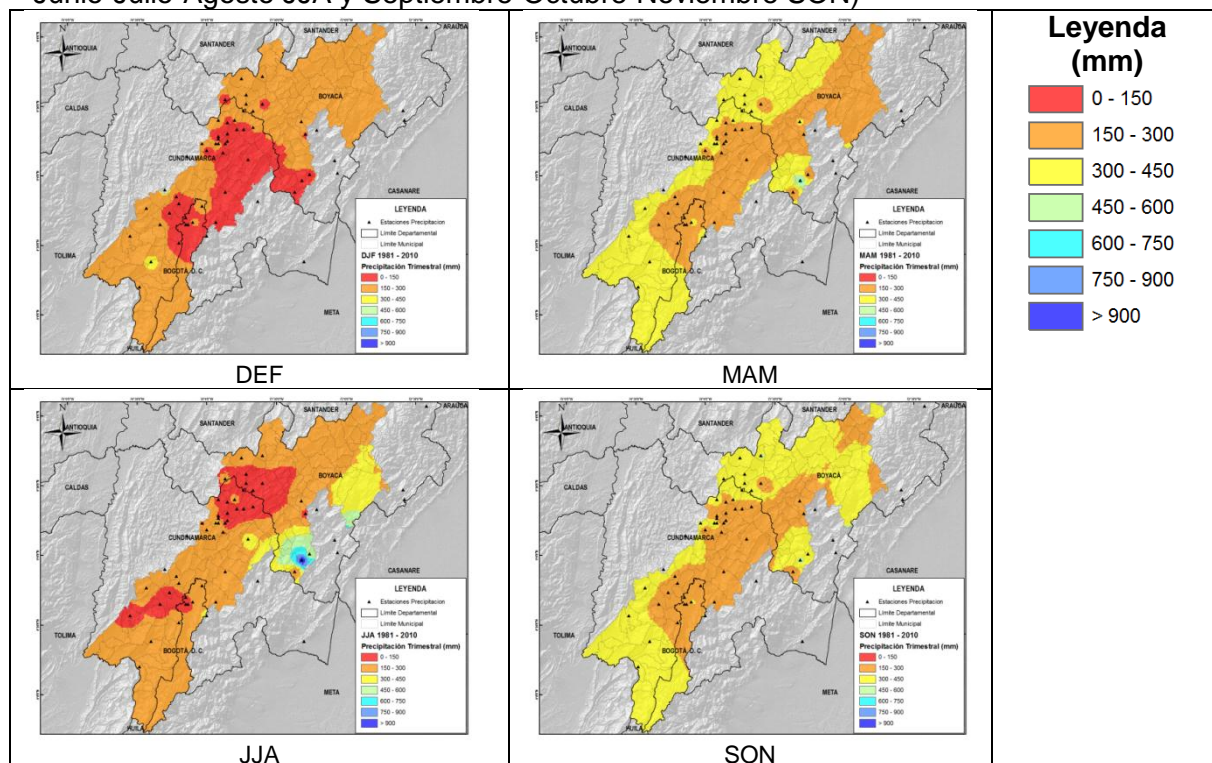
#### **4.1.1 Precipitación**

La ZCIT, principal modulador de las lluvias en el centro del país, genera dos periodos de lluvia y dos periodos secos. En los periodos secos las lluvias no desaparecen del todo, ello explicado por procesos físicos de orden local (convecciones locales), que ocasionan algunos episodios húmedos, explicando así la alta variación espacial (metros a kilómetros) de la precipitación en la zona.

El altiplano Cundiboyacense presenta un comportamiento bimodal a excepción de la zona oriente (municipios de Macanal, Chivor, Garagoa entre otros). En dicha zona se observa un comportamiento monomodal, cuyo periodo de lluvias se presenta desde abril hasta de octubre, y un periodo seco entre noviembre y marzo.

Los trimestres Diciembre–Enero–Febrero (DEF) y Junio–Julio–Agosto (JJA), son considerados secos, con un volumen de precipitación inferior a 300 mm trimestrales. En el trimestre DEF la Sabana de Bogotá y parte del Valle de Ubaté (especialmente en Cundinamarca) la precipitación oscila entre 0 – 150 mm, mientras el resto de la zona se encuentra en 150-300 mm. Para el trimestre JJA el valle de Ubaté y Chiquinquirá (Boyacá) y la parte sur del Valle del Chicamocha la precipitación oscila entre 0 – 150 mm trimestrales, siendo más seco éste trimestre que DEF.

**Figura 4-1:** climatología periodo 1981 – 2010 de la precipitación en el altiplano Cundiboyacense (arriba: Diciembre-Enero-Febrero DEF y Marzo-Abril-Mayo MAM; abajo: Junio-Julio-Agosto JJA y Septiembre-Octubre-Noviembre SON)



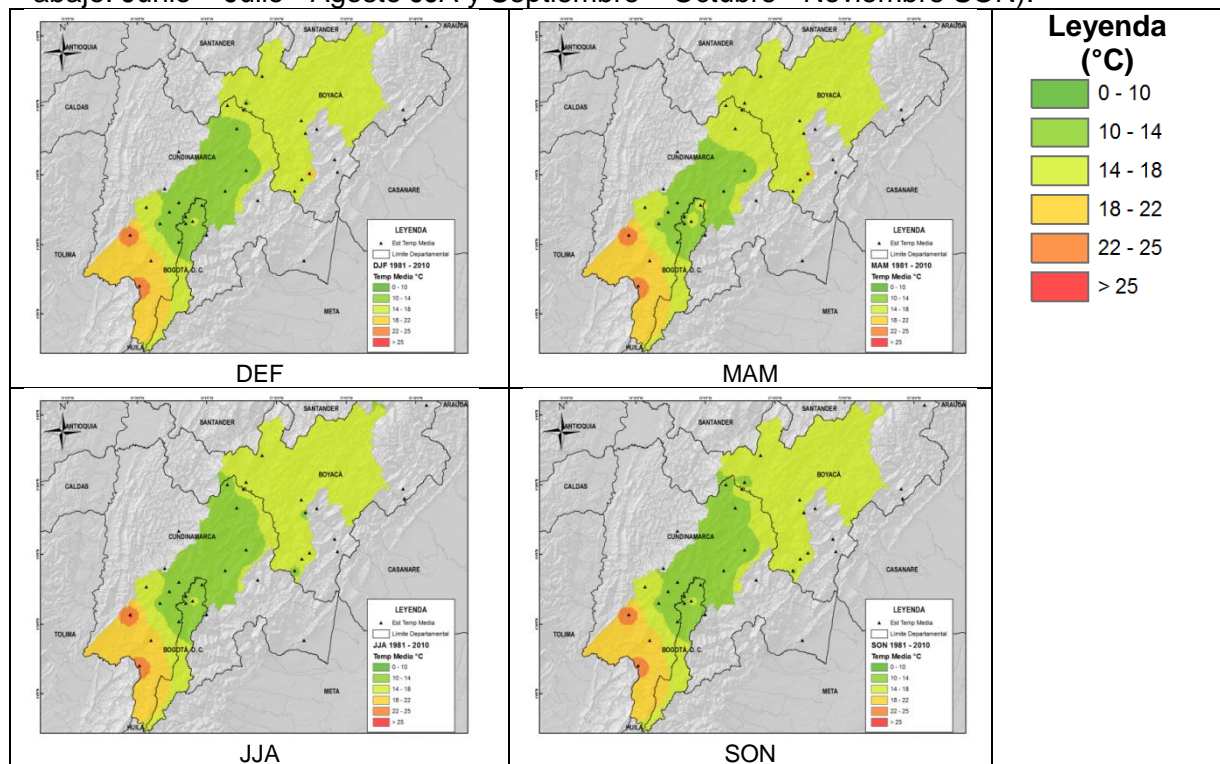
En las temporadas lluviosas, marzo – abril – mayo (MAM) y septiembre – octubre – noviembre (SON), los rangos oscilan entre 150 – 450 mm. Los mayores ubican en la zona sur del altiplano Cundiboyacense y la zona norte del Valle del Chicamocha (Duitama, Santa Rosa, Paipa etc.), sector de Boyacá del Valle de Ubaté y Chiquinquirá (Tinjacá, Raquira, Chiquinquirá, etc.) y sector oriental de la Sabana de Bogotá. No existe una diferencia en la cantidad de lluvias de los trimestres.

#### 4.1.2 Temperatura

- **Temperatura media**

A nivel espacial la temperatura del altiplano oscila entre 10°C y 18°C. La zona más fría se ubica en la Sabana de Bogotá, y la más cálida hacia al sur del altiplano. A nivel temporal, la variación de la temperatura media es de tan sólo pocos grados, no más de 2°C.

**Figura 4-2:** climatología periodo 1981 – 2010 de la temperatura media en el altiplano Cundiboyacense (arriba: Diciembre – Enero - Febrero DEF y Marzo – Abril - Mayo MAM; abajo: Junio – Julio - Agosto JJA y Septiembre – Octubre - Noviembre SON).



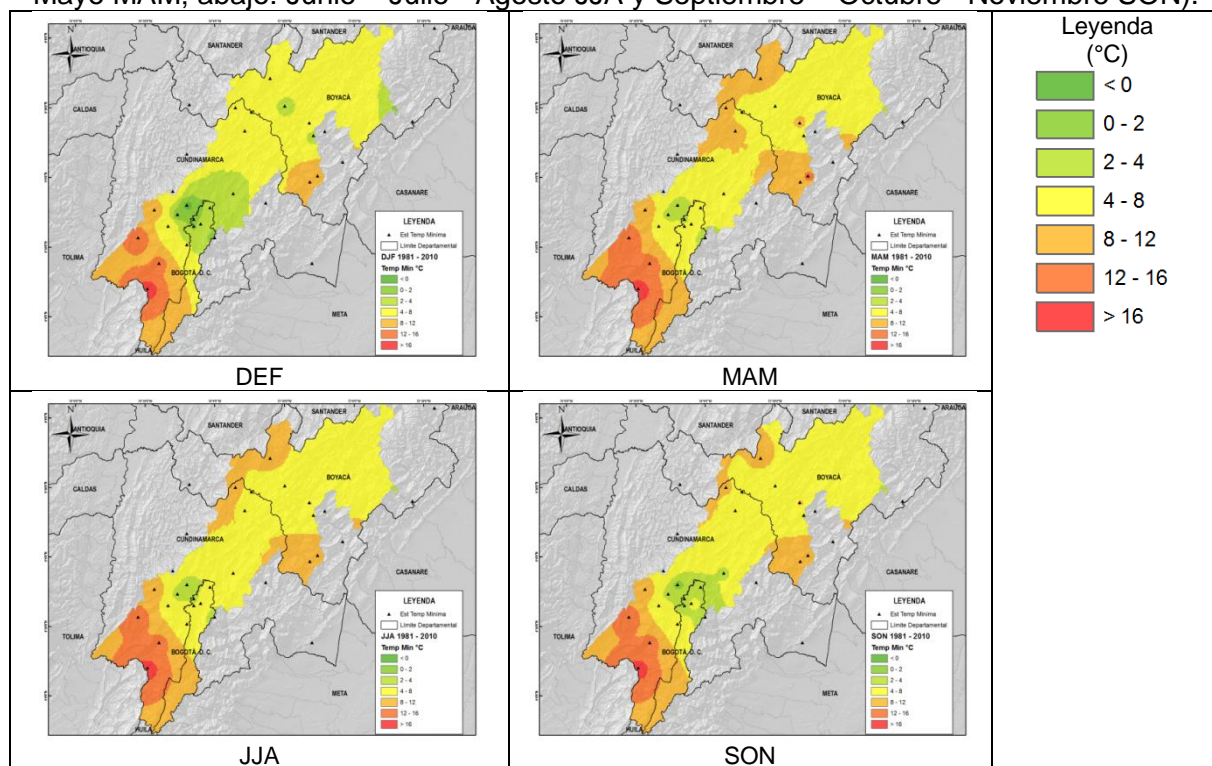
En el trimestre DEF, primera temporada seca del año, la sabana de Bogotá y parte sur del valle de Ubaté y Chiquinquirá, presenta temperaturas medias de entre 10°C y 14°C mientras la zona norte del valle de Ubaté y Chiquinquirá y valle del Chicamocha las temperaturas medias se encuentran entre 14°C y 18°C.

Para MAM (primera temporada de lluvias), el comportamiento espacial muestra una tendencia similar al anterior trimestre, sólo que en éste trimestre el sur del valle de Ubaté y Chiquinquirá pasa de encontrarse del rango 10 – 14 °C a 14 – 18°C, ello se debe a que éste periodo se caracteriza por una intensa nubosidad que hace que los valores de temperatura máxima y mínima no estén tan alejados uno del otro. En JJA y SON la distribución espacial de la temperatura tiende a ser similar que en los trimestres anteriores.

- **Temperatura mínima media**

A nivel espacial la temperatura mínima media trimestral presenta un comportamiento relativamente homogéneo, ubicándose en el rango de 2 – 12 °C, concentrándose los valores mínimos en la sabana de Bogotá y los máximos en el occidente de la zona.

**Figura 4-3:** climatología periodo 1981 – 2010 de la temperatura mínima media en el altiplano Cundiboyacense (arriba: Diciembre – Enero - Febrero DEF y Marzo – Abril - Mayo MAM; abajo: Junio – Julio - Agosto JJA y Septiembre – Octubre - Noviembre SON).



En el trimestre DEF la sabana de Bogotá se ubica en el rango de 2 – 4 °C, siendo la zona de mayor susceptibilidad a eventos extremos tales como son las heladas. El valle de Ubaté y Chiquinquirá y el valle de Chicamocha los valores se localizaron en el rango 4 – 8 °C, siendo más altos que los de la sabana de Bogotá.

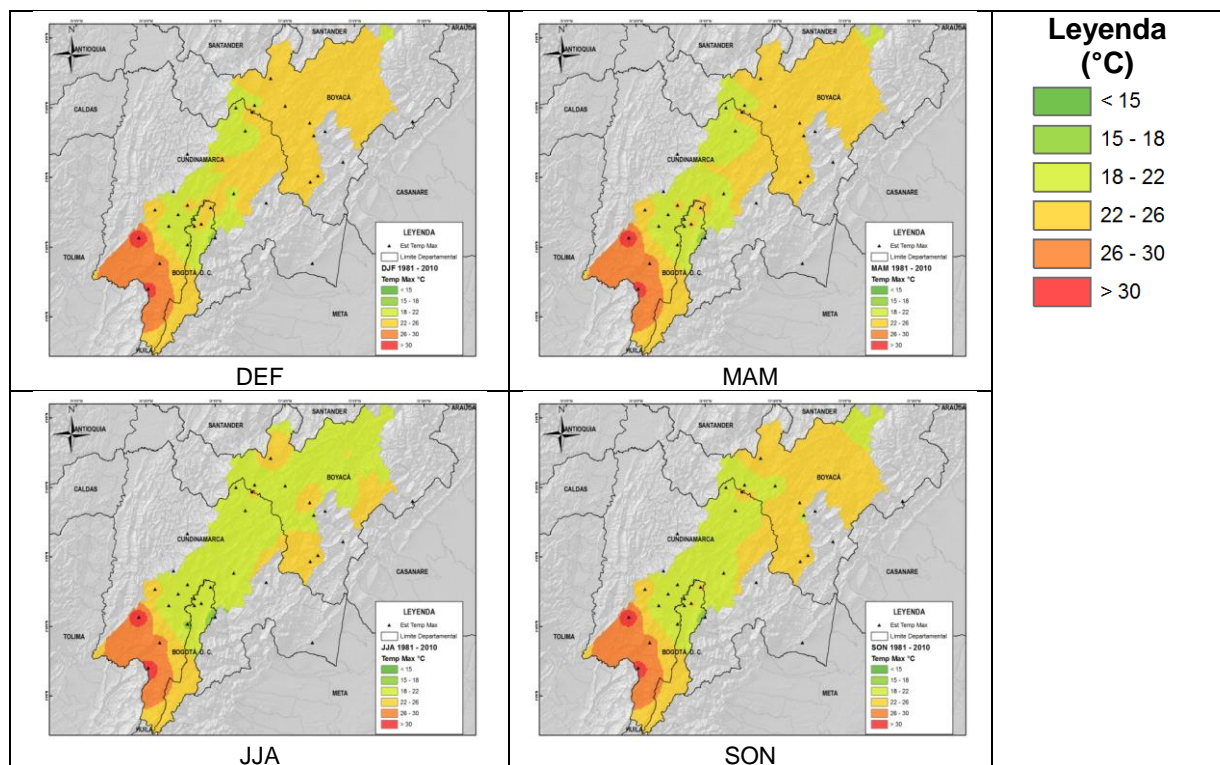
En el trimestre MAM existe un desplazamiento de los rangos de temperatura mínima media, es decir, algunas zonas localizadas en el rango 2 – 4 °C en el trimestre inmediatamente anterior, ahora se localizan en el rango 4 – 8 °C (sabana de Bogotá), obedeciendo principalmente a que la nubosidad propia de la época evita la pérdida calor.



Los trimestres JJA y SON, muestran un comportamiento similar a DEF y MAM respectivamente, con un ligero aumento de la temperatura, especialmente en el valle de Ubaté y Chiquinquirá, pudiendo llegar a 12°C.

### • Temperatura máxima media

**Figura 4-4:** climatología periodo 1981 – 2010 de la temperatura máxima media en el altiplano Cundiboyacense (arriba: Diciembre – Enero - Febrero DEF y Marzo – Abril - Mayo MAM; abajo: Junio – Julio - Agosto JJA y Septiembre – Octubre - Noviembre SON).



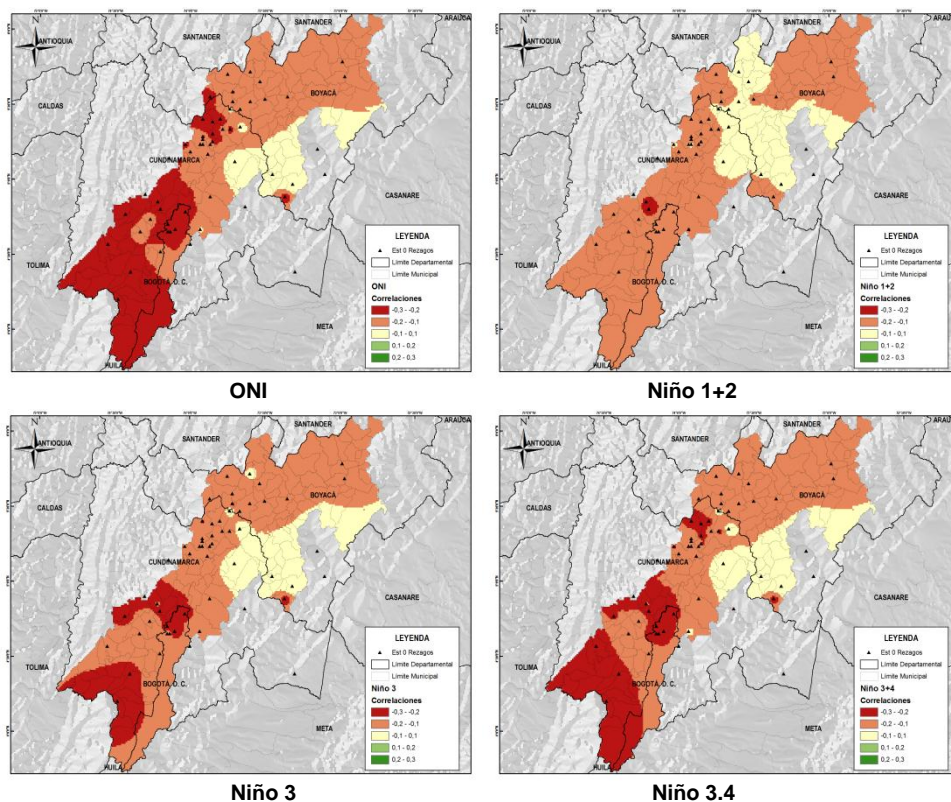
En el altiplano la temperatura máxima media oscila en el intervalo 15 – 18°C a 22 – 26°C. Espacialmente, el valle de Ubaté y Chiquinquirá y la sabana de Bogotá presenta temperaturas máximas en el intervalo 18 – 22°C para los cuatro trimestres del año, mientras el valle del Chicamocha presenta temperaturas en el intervalo 22 – 26°C, siendo superior a las demás zonas.

## 4.2 Análisis de variabilidad climática interanual en la zona

### 4.2.1 Determinación del grado de asociación lineal entre los ENSO y la precipitación

La correlación cruzada muestra el tiempo de respuesta o inercia con el que una variable explicada reacciona a la fluctuación de una variable explicativa, por ello a partir de la aplicación de dicha metodología se buscó identificar la asociación entre las variables climáticas (variable explicada) y los índices oceánicos (variable explicativa) que explican el comportamiento de los ENSO, obteniendo lo mostrado en la Figura 4-5.

**Figura 4-5:** Mapas de correlaciones lineales entre la precipitación acumulada mensual y el índice ONI y la TSM para la regiones 1+2, 3 y 3.4.



Como resultado se observó un grado de asociación lineal bajo entre la precipitación y los índices oceánicos analizados, tan sólo el índice ONI presento relativamente los valores más altos de correlación (color rojo - correlaciones entre -0.2 y -0.3 en el departamento



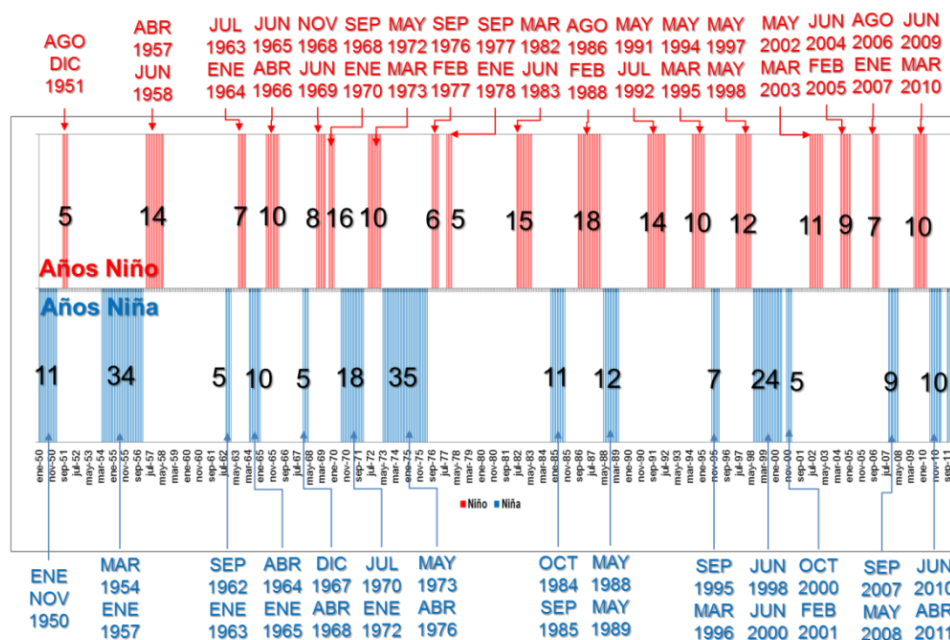
de Cundinamarca, -0.2 y -0.1 en Boyacá y norte de Cundinamarca). En el oriente de Boyacá se observó bajo grado de asociación lineal con los índices utilizados.

Dado que el grado de asociación lineal entre el ONI y la precipitación no es muy alto, debido que las lluvias no sólo responden a fenómenos ENSO sino también a otras fuentes de variabilidad climática (Oscilación QBO y MJO, movimiento de la ZCIT, entre otros) es un hecho evidente que el fenómeno incide sobre el territorio, por lo que se optó por utilizar un análisis estadístico con base en tablas de contingencia, identificando por temporadas agroclimáticas las alteraciones más probables provocados

### 4.2.2 Análisis temporal del Índice Oceánico El Niño (ONI)

Para el análisis de los impactos de los eventos ENSO sobre las variables climáticas se utilizó al índice oceánico ONI, ya que si bien mostró una aceptable asociación lineal, éste índice resulta ser el de mayor relevancia a nivel internacional para clasificar los eventos El Niño/La Niña y periodos de neutralidad.

**Figura 4-6:** línea de tiempo de los eventos El Niño/La Niña para el periodo 1950 – 2012



La Figura 2-4 muestra la oscilación temporal del ONI en el periodo 1950 – 2010. Como se explicó anteriormente un valor de índice mayor a 0.5, sostenido durante 5 meses

puede ser considerado como episodio El Niño, mientras un valor menor a -0.5, sostenido durante 5 meses puede considerarse como La Niña; en éste sentido la fig. Figura 4-6 adapta esos episodios a trimestres, ya que el análisis de los efectos de los fenómenos ENSO con las variables climáticas fue realizado a partir del mismo periodo temporal. Un rasgo destacable es la mayor ocurrencia de episodios El Niño frente a La Niña, además de ser más cortos, éstos comienzan a presentarse en su mayoría a partir del tercer trimestre (JJA), salvo los eventos 1957-1958 y 1969 que comenzaron en MAM y DJF, teniendo su mayor desarrollo hacia finales y principios del segundo año (DJF). Ésta condición normalmente abarca un periodo de 2 a 5 trimestres salvo el episodio 1986 a 1988 que duró algo más de 6 trimestres.

Los eventos La Niña aunque menos frecuentes, han sido mucho más extensos. Nada más los episodios 1954 a 1957 y 1973 a 1976 duraron en promedio 11 trimestres (más de 30 meses), donde persistieron las condiciones frías en el pacífico tropical.

Un análisis más profundo en la línea de tiempo de los eventos muestra que en total se desarrollaron 13 episodios La Niña frente a 18 episodios El Niño (Figura 4-6), cuya alternancia se dio de manera que al presentarse un evento El Niño, normalmente era seguido por un evento La Niña y viceversa, sin antes presentarse breves (entre tres y cinco meses) o largos (hasta 5 años) periodos de condiciones neutras.

#### **4.2.3 Análisis de variabilidad climática interanual por variable climática**

Algunas investigaciones tales como Montealegre (2007) y (2009), Pabón y Montealegre (1998), entre otros, mostraron una clara relación entre los eventos ENSO y el comportamiento de las variables climáticas en algunos lugares del país. Según Hurtado y González (2011), los eventos El Niño y La Niña en un 80% impactan por déficit y excesos de precipitación el 50% de los territorios pertenecientes a las regiones Caribe y Andina por lo que es confiable realizar su predicción.

En otras variables tales como la temperatura máxima y media, Rojas (2011) encontró una asociación directa y muy clara con la oscilación ENSO en la sabana de Bogotá, mientras la temperatura mínima y el brillo solar mostraron poca o ninguna asociación con ésta oscilación. Además mostró que la mayor asociación entre los ENSO y las variables

mencionadas se da en los últimos y primeros (con mayor fuerza) meses del año tales como noviembre, diciembre, enero y febrero.

- **Correlación entre el índice ONI y las variables climáticas en el altiplano Cundiboyacense.**

Se realizó el análisis de correlación entre la temperatura (max., med. y min.), humedad relativa y brillo solar con el índice ONI, mostrando resultados similares a lo realizado con la precipitación (aceptable grado de asociación con el índice ONI). Sólo para la temperatura mínima y el brillo solar mostraron poca asociación lineal con el ONI (Anexo E)

En conclusión los valores de correlación sugieren aceptables niveles de asociación entre las lluvias y el índice ONI, ratificando lo señalado por Montealegre (2009) ya que según como lo explica el mismo autor, aunque los valores de correlación sean bajos, los procesos océano - atmosféricos que rigen el comportamiento de cada una de las variables climáticas no sólo se encuentran influenciados por la fluctuación de la TSM, sino también por otros factores tales como la latitud, el relieve, la época del año (comportamiento de la ZCIT) entre otros.

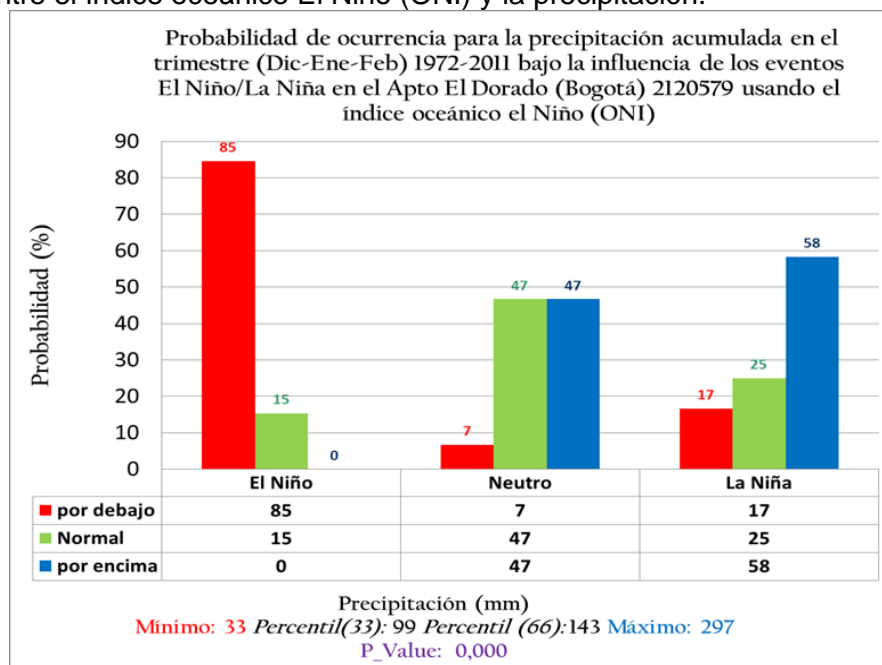
- **Comportamiento de las variables climáticas durante los eventos El Niño y La Niña sobre el altiplano Cundiboyacense**

El análisis consistió en establecer cuál es la alteración más probable de cada variable bajo la influencia de un evento ENSO; para cumplir con dicho objetivo se empleó análisis compuesto (AC), comparando las series históricas del ONI (promedio trimestral) con los valores trimestrales de cada variable.

A manera de ejemplo, la Figura 4-7 muestra la gráfica y tabla de contingencia que representa la alteración más de la precipitación acumulada en el trimestre DEF bajo la influencia de los eventos ENSO (incluido periodo neutro), en la estación Aeropuerto El Dorado de Bogotá. La tabla sintetiza las alteraciones probables de los diferentes eventos en situaciones *por debajo de lo normal*, *dentro de lo normal* y *por encima de lo normal*.

En época El Niño existe una probabilidad del 85% que la precipitación presente valores por debajo de lo normal, o sea, que las precipitaciones acumuladas por trimestre estén entre **33.0 mm** y **99.0 mm**; de la misma forma, hay un 15% de probabilidad que se presenten precipitaciones dentro de lo normal, es decir, valores entre **99.0 mm** y **143.0 mm** de lluvia acumulada y no hay ninguna probabilidad de que la lluvia esté por encima de lo normal en la estación de El Dorado cuando se presenta el fenómeno de “El Niño”.

**Figura 4-7:** gráfica de contingencia de la estación Apto El Dorado, estableciendo la relación entre el índice oceánico El Niño (ONI) y la precipitación.



Bajo un evento La Niña existe una probabilidad del 58% que la precipitación acumulada esté por encima de lo normal (**143.0 mm a 297.0 mm**) en esta estación que hace referencia al percentil 66 y el valor máximo registrado para la estación de El dorado. En años Neutros la precipitación tiene una probabilidad del 47% de estar por encima de lo normal o de ser igual a lo normal. Aunque el porcentaje no sea alto en términos de probabilidad, cabe destacar que ésta se reparte en tres categorías dando más peso a probabilidades mayores al 33%.

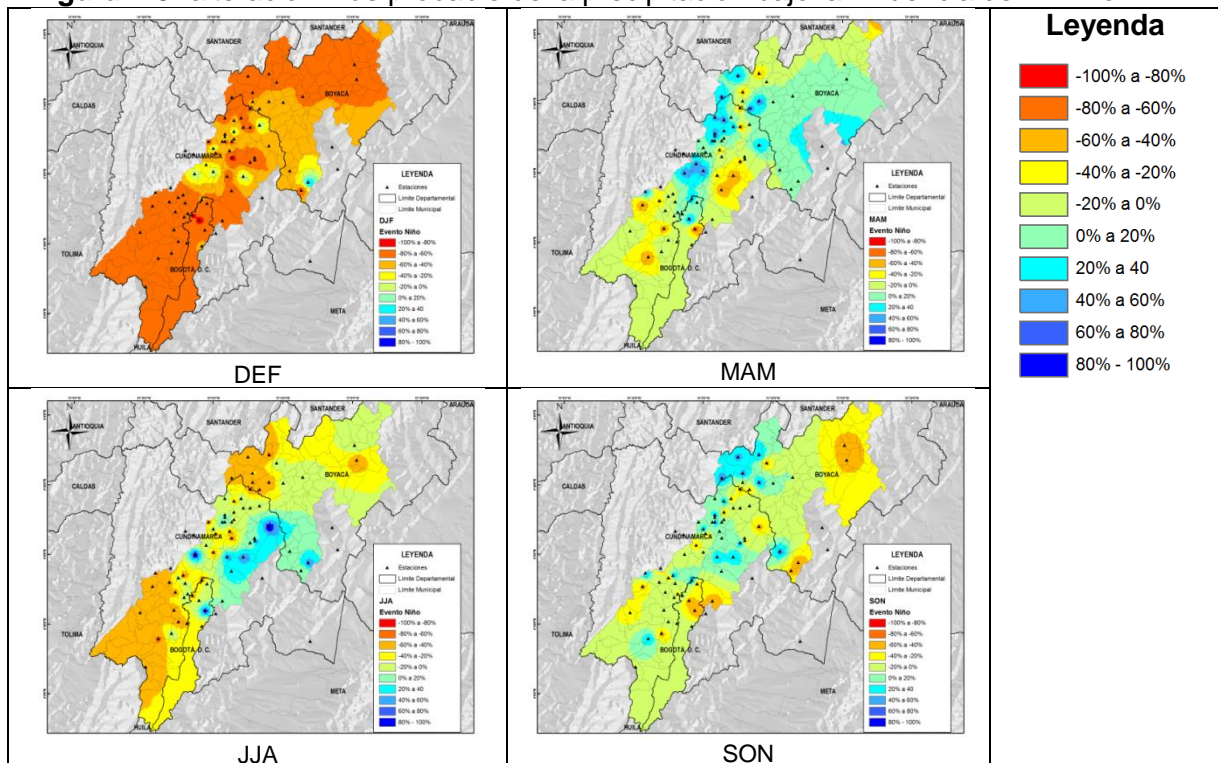
Los resultados anteriores se presentan con un nivel de significancia o un P-valor de 0,000, validando el planteamiento de que la precipitación registrada en esta estación es modulada en gran parte por eventos ENSO.

La técnica de análisis compuesto se aplicó a cada variable agrupada por trimestre agrícola de cada estación con los siguientes resultados representados espacialmente.

• **Comportamiento de las variables climáticas bajo la influencia de El Niño**

**Precipitación:** El comportamiento de la precipitación acumulada en el altiplano, muestra que El Niño tiene un mayor efecto en el trimestre DEF, ya que entre el 60% a 80% de los casos (periodo 1981 - 2010), la precipitación estuvo por debajo del promedio normal. En el trimestre JJA, considerado como la segunda temporada seca del año, la probabilidad estuvo entre un 40% y 60% de que las precipitaciones estén por debajo del promedio climatológico, principalmente en el valle de Ubaté y Chiquinquirá y zona centro de la sabana de Bogotá, y entre un 40% y 60% de que las precipitaciones se encuentren por encima de lo normal, principalmente en la parte oriental del altiplano Cundiboyacense y zona norte de la sabana de Bogotá, evidenciando que ante el acaecimiento de un evento El Niño, éste afecta principalmente el primer trimestre del año.

**Figura 4-8:** alteración más probable de la precipitación bajo la influencia de El Niño

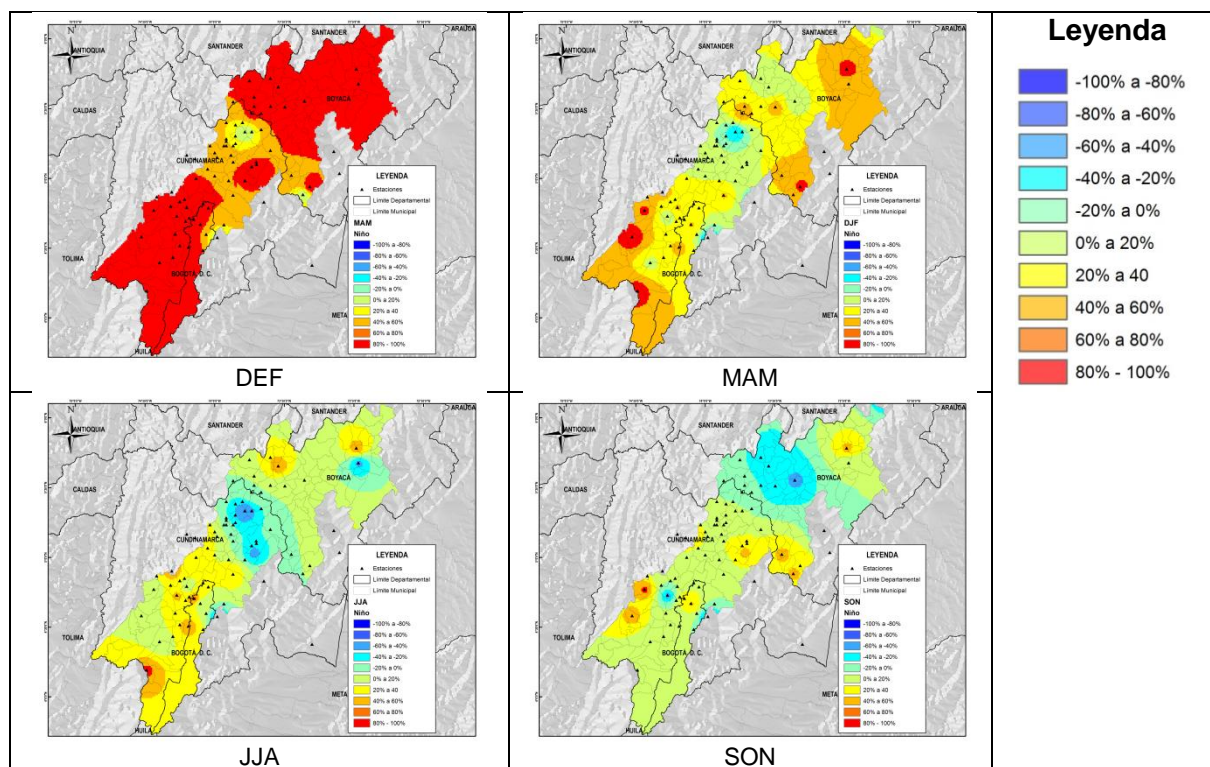


En las témporas lluviosas (MAM y SON) el fenómeno de El Niño afecta principalmente la parte norte y sur con probabilidades hasta un 50% de que las lluvias estén por debajo de

lo normal; en la parte central presenta probabilidades de que la lluvia se comporte dentro de lo normal y en varios sectores tales como el valle de Ubaté y Chiquinquirá y zona norte de la sabana de Bogotá, halla hasta un 80% de probabilidad que se presenten lluvias por encima de lo normal.

**Temperatura media:** ante un evento El Niño muestra una fuerte influencia en su comportamiento, especialmente en el primer trimestre DEF, ya que entre el 60 y 100% de los casos los valores de temperatura tienden a comportarse por encima del promedio normal especialmente en el norte y sur del altiplano Cundiboyacense. Para MAM, la probabilidad no supero el 60%, encontrando algunas zonas cuyo comportamiento tiende a estar en el promedio normal, tales como el sur del valle de Ubaté y Chiquinquirá y norte de la sabana de Bogotá.

**Figura 4-9:** alteración más probable de la temperatura media bajo la influencia de El Niño

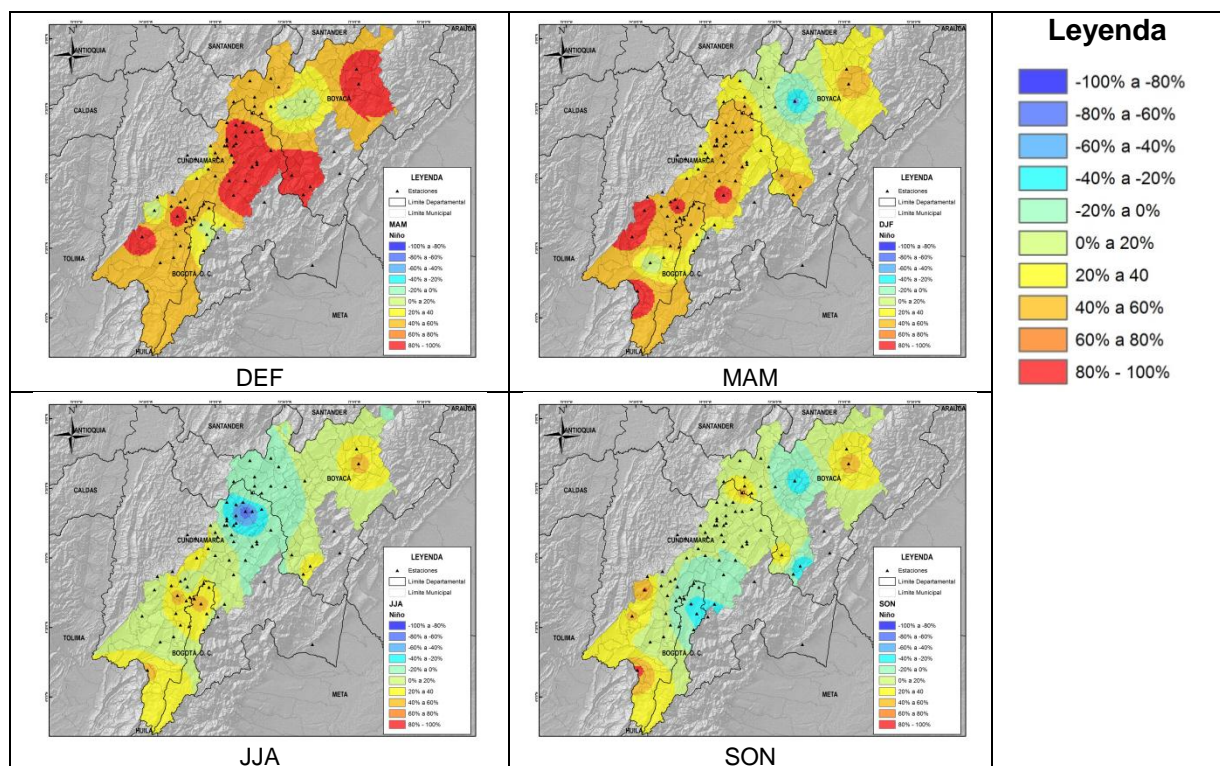


En los trimestres JJA y SON los valores no sobrepasaron el 40% de probabilidad, tanto por encima como por debajo de lo normal, siendo trimestres que a pesar que se encuentren bajo el desarrollo de un evento El Niño, su valor no es alterado considerablemente, caso contrario a lo observado en DEF.



**Temperatura máxima:** la mayor influencia se presenta en el primer semestre del año. En la primera temporada seca (DEF), la probabilidad que los valores de temperatura máxima tiendan a estar por encima del promedio normal dado un evento El Niño está entre un 80 y 100% en los sectores sur del valle de Ubaté y Chiquinquirá y norte de la sabana de Bogotá, mientras para las otras zonas, los valores no superan el 60% de probabilidad. En el trimestre MAM las probabilidades decrecen significativamente ubicándose entre un 20 y 40% que las temperaturas máximas tiendan a comportarse por encima de lo normal, especialmente para el valle de Ubaté y sabana de Bogotá. En el sector norte del altiplano (Valle de Chicamocha) la probabilidad fluctúa entre lo normal hasta un 50% de que el valor de temperatura se comporte por debajo de lo normal.

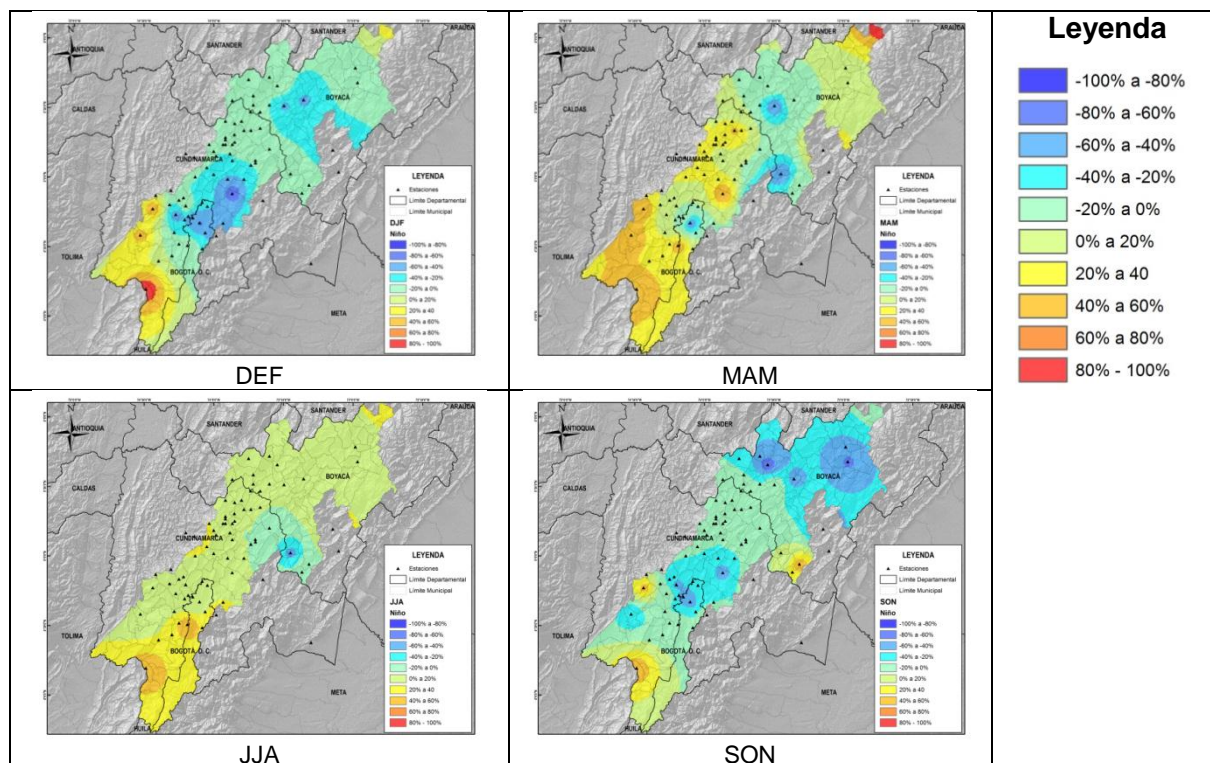
**Figura 4-10:** alteración más probable de la temperatura máxima bajo la influencia de El Niño



En el segundo semestre la influencia de un evento El Niño baja significativamente su intensidad, quedando con valores de probabilidad no mayores al 40% tanto por debajo como por encima de lo normal a lo largo del altiplano.

**Temperatura mínima:** la influencia del evento El Niño sobre el comportamiento de la temperatura mínima no es fuerte, dado que el valor de probabilidad no supera el 40% tanto por debajo como por encima del promedio climatológico normal a lo largo del altiplano Cundiboyacense.

**Figura 4-11:** alteración más probable de la temperatura mínima bajo la influencia de El Niño



- Comportamiento de las variables climáticas bajo la influencia de La Niña**

**Precipitación:** el impacto del fenómeno de La Niña a lo largo del altiplano es notorio ya que existen regiones que entre un 80 – 100 % de los casos incrementan las precipitaciones por encima del promedio normal. Los trimestres DEF, JJA y SON, muestran un claro comportamiento a presentar precipitaciones por encima de lo normal, mientras el trimestre MAM las precipitaciones tienden a comportarse dentro de lo normal.

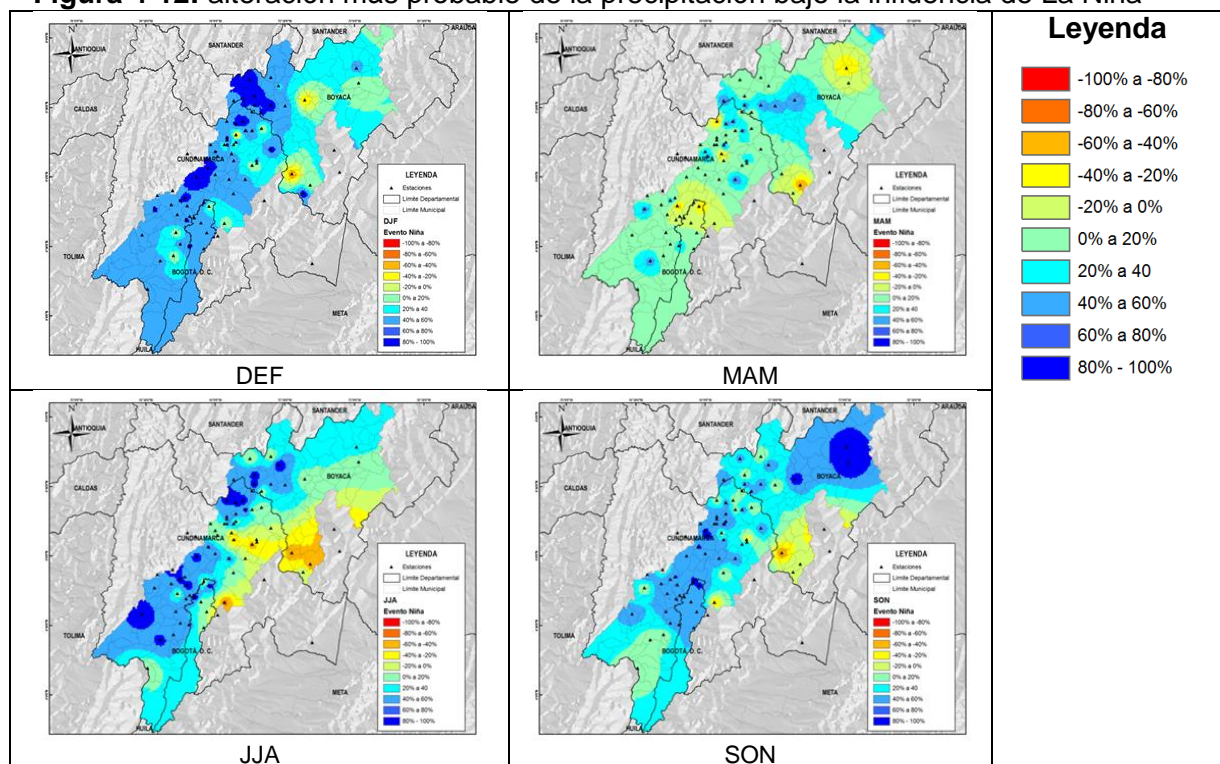
En el trimestre DEF se observa que la zona sur, centro y centro occidental, la probabilidad que se presenten lluvias por encima de lo normal se encuentra casi en un 100 %, especialmente para la sabana de Bogotá, valle de Ubaté y Chiquinquirá y zona



sur del valle del Chicamocha, mientras la zona norte y oriental del altiplano, la precipitación muestra una tendencia a comportarse dentro de lo normal.

En el periodo JJA, segunda temporada seca del año, la precipitación tiende a comportarse dentro de lo normal, con algunos episodios deficitarios ubicados en el oriente del altiplano, cuya climatología es propia del piedemonte llanero. Hacia el valle de Ubaté y Chiquinquirá y sabana de Bogotá, la probabilidad de incremento de precipitaciones por encima de lo normal alcanza intervalos entre 40 y 100%.

**Figura 4-12:** alteración más probable de la precipitación bajo la influencia de La Niña



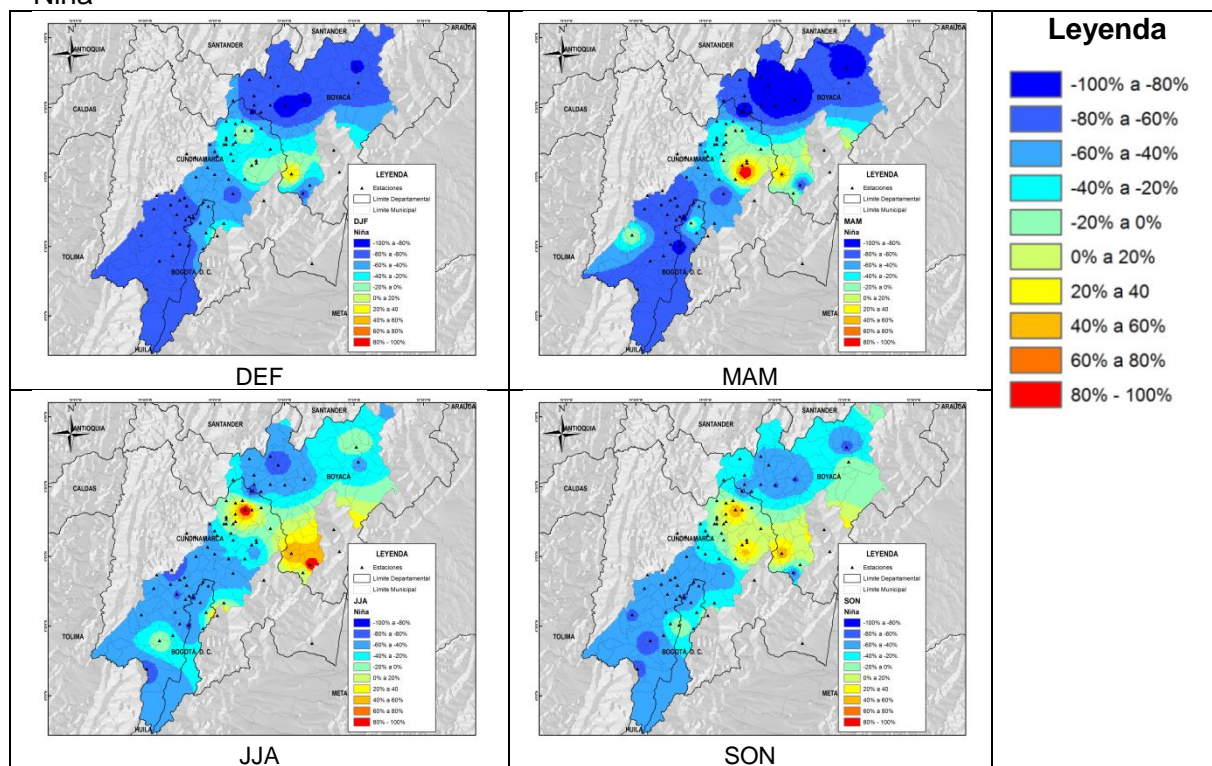
El trimestre SON muestra que si bien la probabilidad no más allá del 60% de que hayan periodos de lluvia por encima de lo normal en un evento La Niña, zonas como el valle del Chicamocha muestran valores entre 80 y 100% que las precipitaciones se comporten por encima de lo normal.

**Temperatura media:** los efectos de La Niña tienen mayor influencia en el primer semestre del año (DEF y MAM) causando que la temperatura media presente valores por debajo de lo normal entre un 80 y 100% de los casos (probabilidad). El norte de la

sabana de Bogotá y sur del valle de Ubaté y Chiquinquirá muestra una tendencia de la temperatura media a comportarse dentro del promedio normal, mientras en el oriente del altiplano la temperatura tiende a comportarse por encima de lo normal.

En el segundo semestre la influencia del fenómeno es de menor intensidad, hasta en 80% de probabilidad que se presentan temperaturas por debajo de lo normal en sectores del norte, sur y amplios sectores del occidente del altiplano.

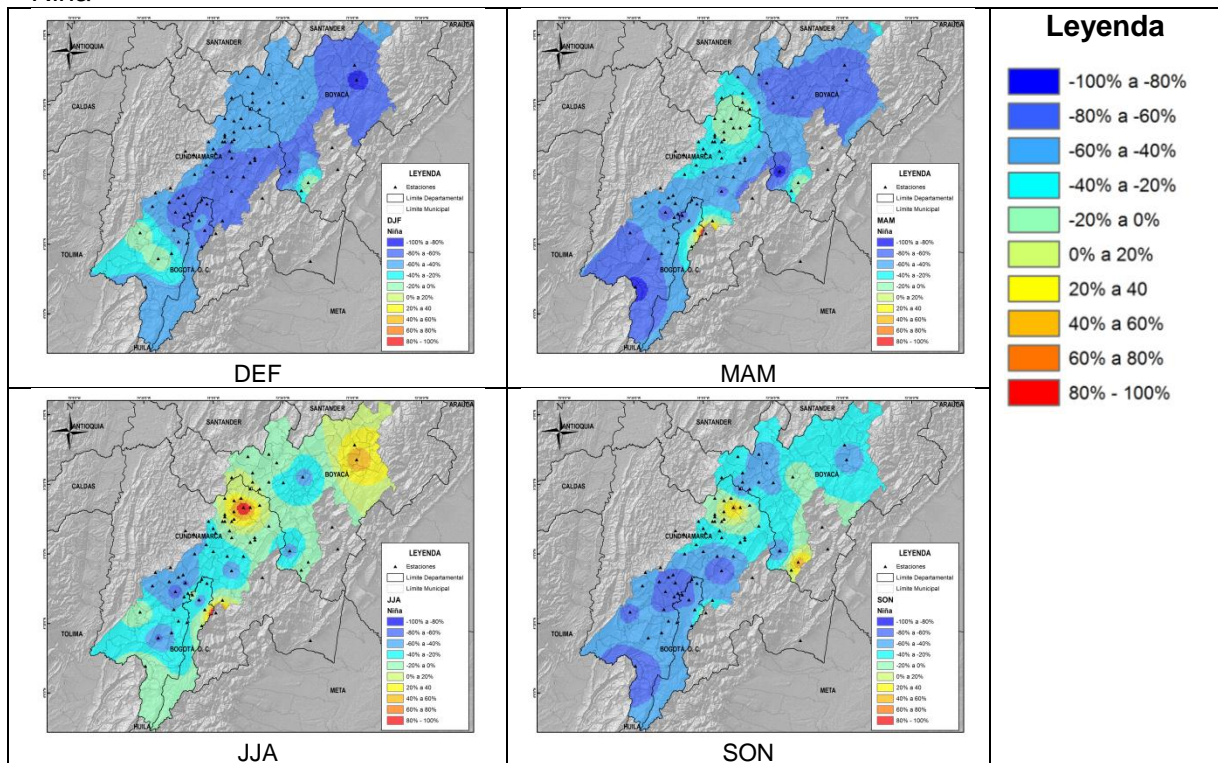
**Figura 4-13:** alteración más probable de la temperatura media bajo la influencia de La Niña



**Temperatura máxima:** la influencia de La Niña en ésta variable no es tan importante como en la temperatura media. Se observa que en el trimestre DEF la sabana de Bogotá, norte del valle del Chicamocha y zona oriental del altiplano existe entre un 60 y 80% de probabilidad que se presenten temperaturas máximas por debajo del promedio normal, mientras el valle de Ubaté y Chiquinquirá y zona sur del valle del Chicamocha muestra valores entre 40 y 60% que dicha variable tenga valores por debajo de lo normal.

El comportamiento del trimestre MAM, primera temporada de lluvias, muestra un descenso en los valores de probabilidad, ubicando la sabana de Bogotá, norte del valle del Chicamocha y zona oriental del altiplano entre un 40 y 60% de probabilidad que haya valores por debajo de lo normal, mientras el valle de Ubaté y Chiquinquirá y valle del Chicamocha presentan valores no mayores al 40%, indicando un comportamiento de la temperatura máxima cercana a lo normal.

**Figura 4-14:** alteración más probable de la temperatura máxima bajo la influencia de La Niña

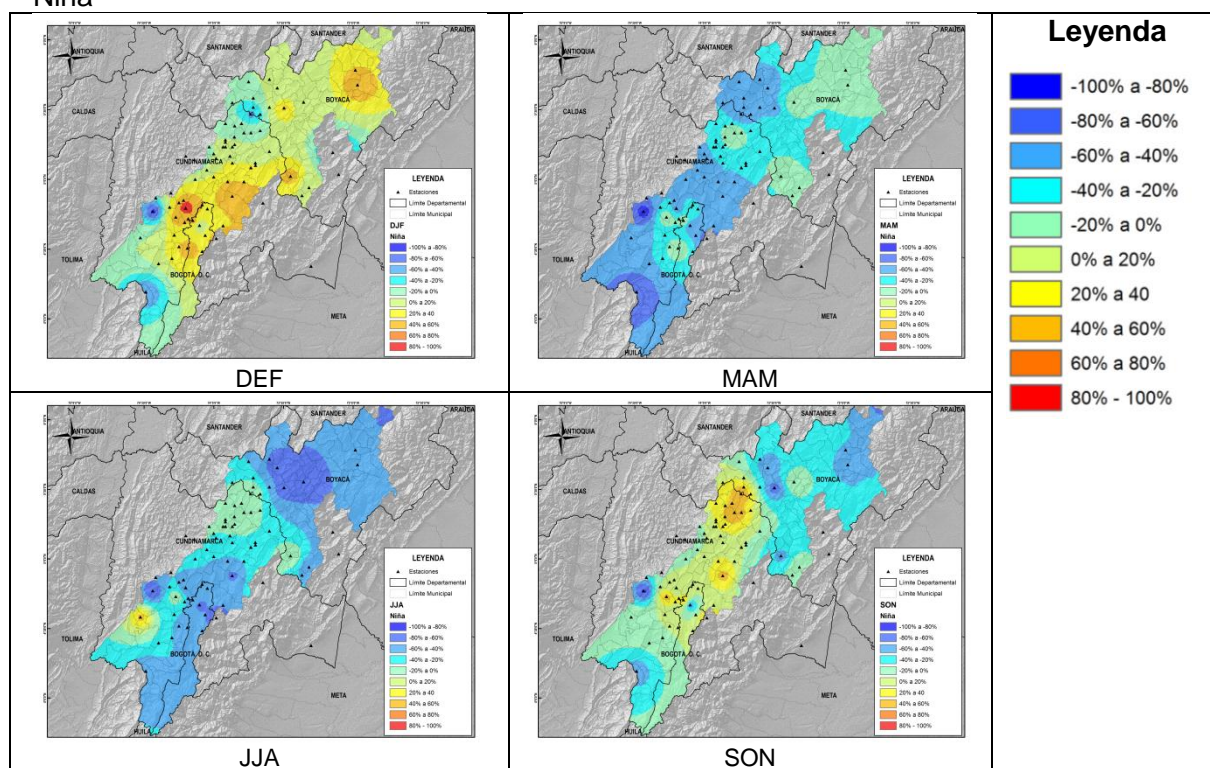


Los trimestres JJA y SON presentan un comportamiento diferente a lo que se observado en el primer semestre. En JJA los valores de probabilidad a lo largo del altiplano muestran una tendencia de la temperatura máxima a comportarse dentro de lo normal, salvo la zona sur y centro del valle de Ubaté y Chiquinquirá, cuyos valores alcanzan hasta un 80% de probabilidad que la variable presente valores por encima de lo normal. El comportamiento de SON muestra en general una tendencia a que la temperatura máxima presente valores dentro de lo normal, salvo algunas regiones como el centro de la sabana de Bogotá cuyas temperaturas tendrían a ser ligeramente en algunas ocasiones por debajo de lo norma.



**Temperatura mínima:** la Niña poco influye sobre el comportamiento de la temperatura mínima a lo largo del altiplano Cundiboyacense, tal como se observa en la figura a continuación. En el primer trimestre del año (DEF), el comportamiento de la temperatura mínima no presenta valores de probabilidad por encima del 40%, indicando que no más de un 40% de las ocasiones que hay un evento La Niña la temperatura tiende a comportarse por debajo (colores azules) o por encima (colores rojizos) de lo normal, salvo la zona centro de la sabana de Bogotá (sector del municipio de Tenjo Cund.), mostrando una tendencia a que la temperatura mínima presente valores por encima de lo normal.

**Figura 4-15:** alteración más probable de la temperatura mínima bajo la influencia de La Niña



En el trimestre MAM, primera temporada de lluvias, la sabana de Bogotá (norte), norte del valle de Ubaté y Chiquinquirá y sur del altiplano presentan probabilidades no mayores al 60% que las temperaturas mínimas tengan valores por debajo de lo normal, mientras el resto del altiplano estaría ligeramente afectado.

Para JJA, el efecto de La Niña es visible hacia el valle del Chicamocha, con intervalos entre 60 y 80% que la temperatura mínima presente valores por debajo de lo normal.

Para el valle de Ubaté y Chiquinquirá y norte de la sabana de Bogotá, la temperatura mínima muestra una tendencia a comportarse dentro de lo normal, mientras el occidente y sur de la sabana de Bogotá muestra una ligera tendencia a presentar valores por debajo de lo normal.

El trimestre SON muestra tener una afectación leve ante la ocurrencia de un evento La Niña, mostrando no más de un 40% de probabilidad que la temperatura se comporte tanto por debajo (color azul), como por encima de lo normal (color rojizo).

### 4.3 Zonificación de las áreas de mayor exposición a las heladas

Como fue mencionado en el numeral 2.1, la exposición se refiere a la condición de desventaja que debido a la ubicación posición o localización de un sujeto, objeto o sistema expuesto al riesgo (Ycaza & Manobanda, 2009), y hace parte de la ecuación de riesgo (ecuación 2.1), la cual es interpretada como: riesgo es igual a amenaza por vulnerabilidad, siendo la exposición parte del último término. La definición de las áreas expuestas a las heladas fue desarrollada a partir de la consulta de diversas fuentes que describieran algunos de los elementos biofísicos que favorecían hasta tal punto los descensos de temperatura que en consecuencia podrían ocasionar un desarrollo de una helada.

#### 4.3.1 Caracterización y calificación de las variables de tipo biofísico utilizadas en la determinación de las áreas de exposición a las heladas

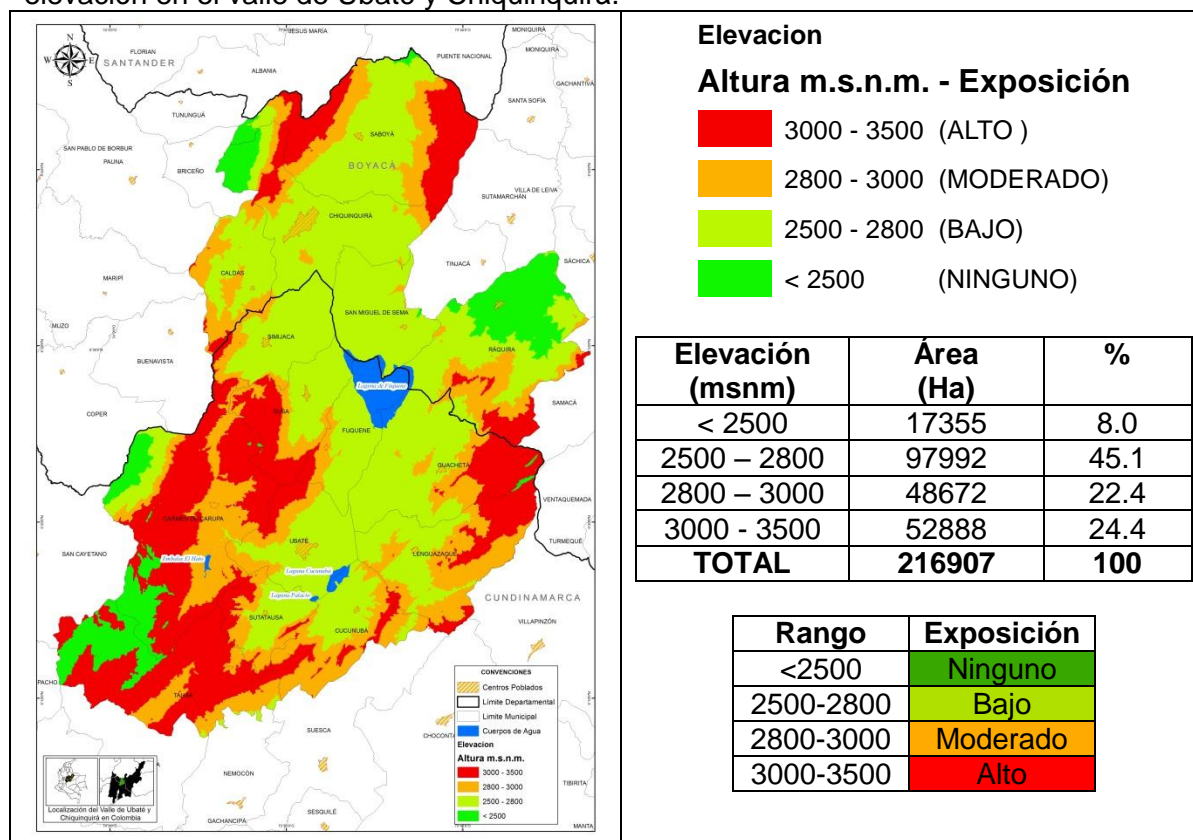
- **Elevación**

Utilizando el mapa de áreas de riesgo del IDEAM (Mayorga, González, & Hurtado, 2008), se estableció que el valle de Ubaté y Chiquinquirá tan sólo tiene un 8.0% de su área por debajo de los 2500 msnm, lo que deja al 92.0% del área restante con condiciones propicias para la ocurrencia de las heladas.

El 45.1% del área de la región (97992 Ha), presenta un **bajo** grado de exposición a heladas, correspondiente a intervalo de elevación entre 2500 y 2800 msnm, siendo de paso la elevación dominante en el valle. Con un 22.4% del área de la región (48672 Ha),

se encuentra el intervalo de elevación entre 2800 y 3000 msnm, asignándole el grado de exposición **moderado**. El grado de exposición **alto**, corresponde al intervalo de elevación entre 3000 y 3500 msnm, con un área de 52888 Ha, equivalente al 24.3%. Cabe destacar que las temperaturas mínimas en estas elevaciones son cercanas a los 0°C siendo constantes enfriamientos y heladas que eventualmente ocasionan pérdidas en la agricultura ya que son lugares muy fríos como los páramos.

**Figura 4-16:** mapa de elevación y calificación de la exposición con respecto a la elevación en el valle de Ubaté y Chiquinquirá.

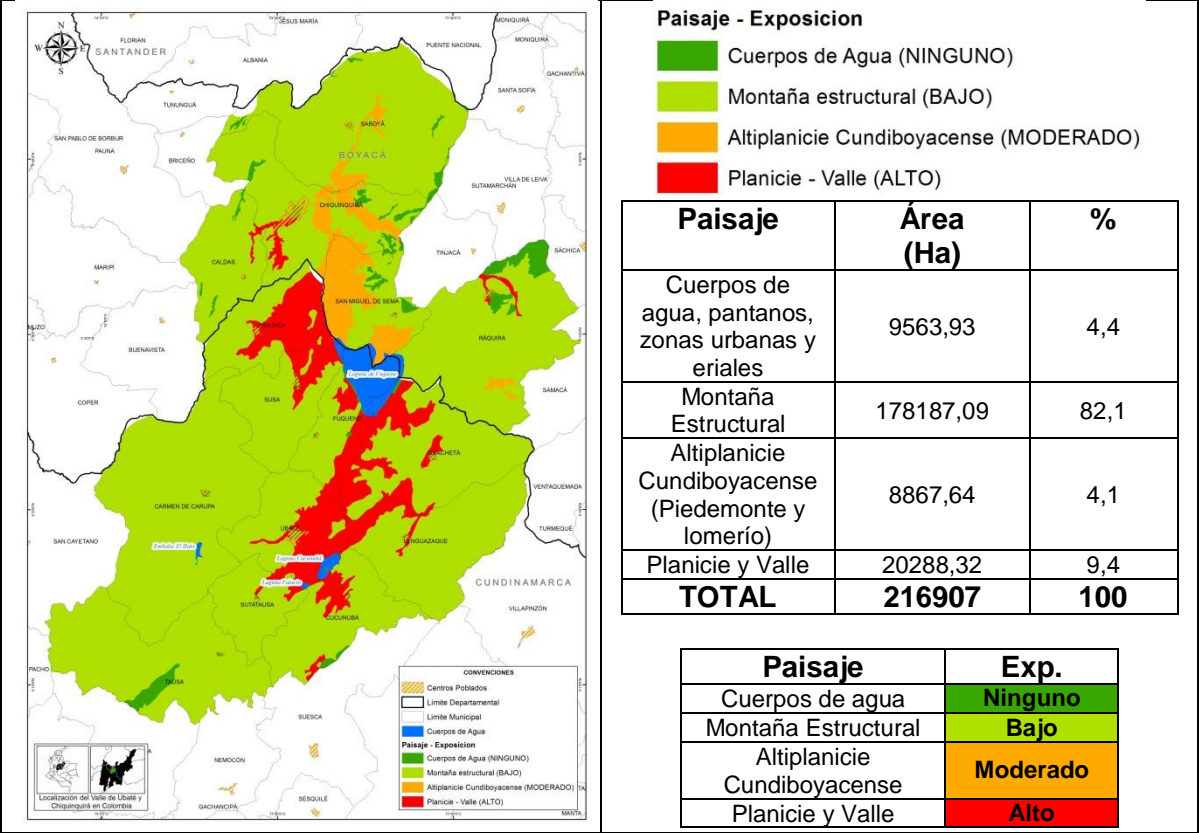


### • Paisajes

Utilizando el mapa de suelos de Boyacá y Cundinamarca elaborado por el IGAC (2006) a escala 1:100.000, se identificaron en el valle de Ubaté y Chiquinquirá los siguientes paisajes: planicie y valle con un área de 20288,3 Ha equivalente al 9.4% con una calificación de **Alto**, altiplanicie Cundiboyacense compuesto por piedemonte y lomerío con un área de 8867,6 Ha equivalente al 4.1% con una calificación de **Moderado**, la montaña estructural (178187,0 Ha) equivalente al 82.1% con una

calificación de **Bajo**, y cuerpos de agua, pantanos, terrenos eriales y zonas urbanas con un área de 9563,9 Ha equivalente al 4.4% con calificación de **Ninguno**.

**Figura 4-17:** mapa de paisaje fisiográfico y calificación de la exposición con respecto al paisaje en el valle de Ubaté y Chiquinquirá.



• **Pendiente**

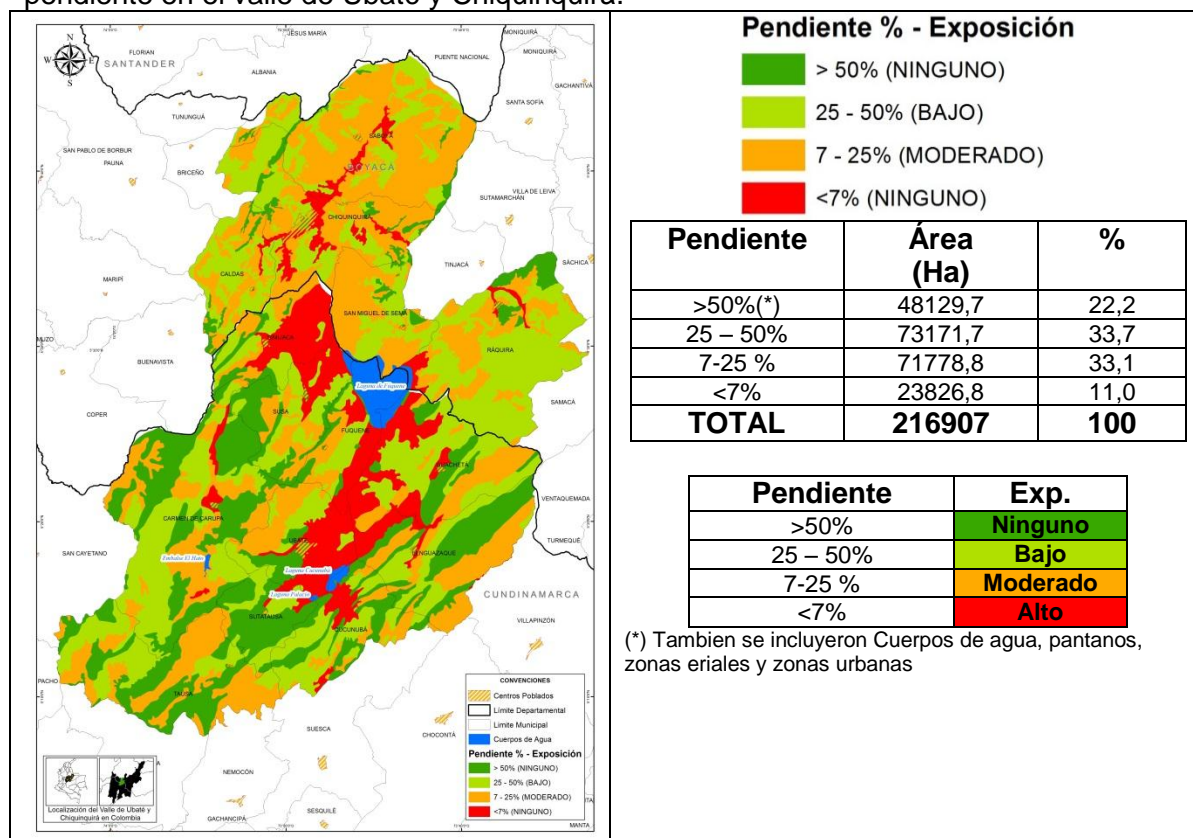
Las pendientes ligeramente escarpadas y/o fuertemente quebradas (25% – 50%), calificadas como **Bajo** ocupan el 33,7% del total con 73171,7 Ha distribuidas en varios sectores a lo largo del valle de Ubaté y Chiquinquirá.

El grado de exposición **Moderado**, asignado a las pendientes entre 7% y 25%, correspondientes a las descripciones: moderadamente inclinada a fuertemente ondulada, ocupan un área de 71778,8 Ha, equivalente al 33,1%, repartido principalmente en el norte del valle de Ubaté y Chiquinquirá, principalmente en los municipios de San Miguel de Sema y Chiquinquirá.



El grado de exposición **Alto**, asignado a pendientes menores al 7% (planas a ligeramente onduladas) ocupan un área de 23826,8 Ha, equivalente al 11% del valle de Ubaté y Chiquinquirá, repartidas entre los municipios de Simijaca, Fúquene, Ubaté y Cucunubá.

**Figura 4-18:** mapa de pendientes y calificación de la exposición con respecto a la pendiente en el valle de Ubaté y Chiquinquirá.



#### • Textura del suelo

Las texturas finas, con una calificación de Bajo, cubre un área aproximada de 35311,15 Ha (16,3%), abarcando pequeñas porciones de cada uno de los municipios del área de estudio.

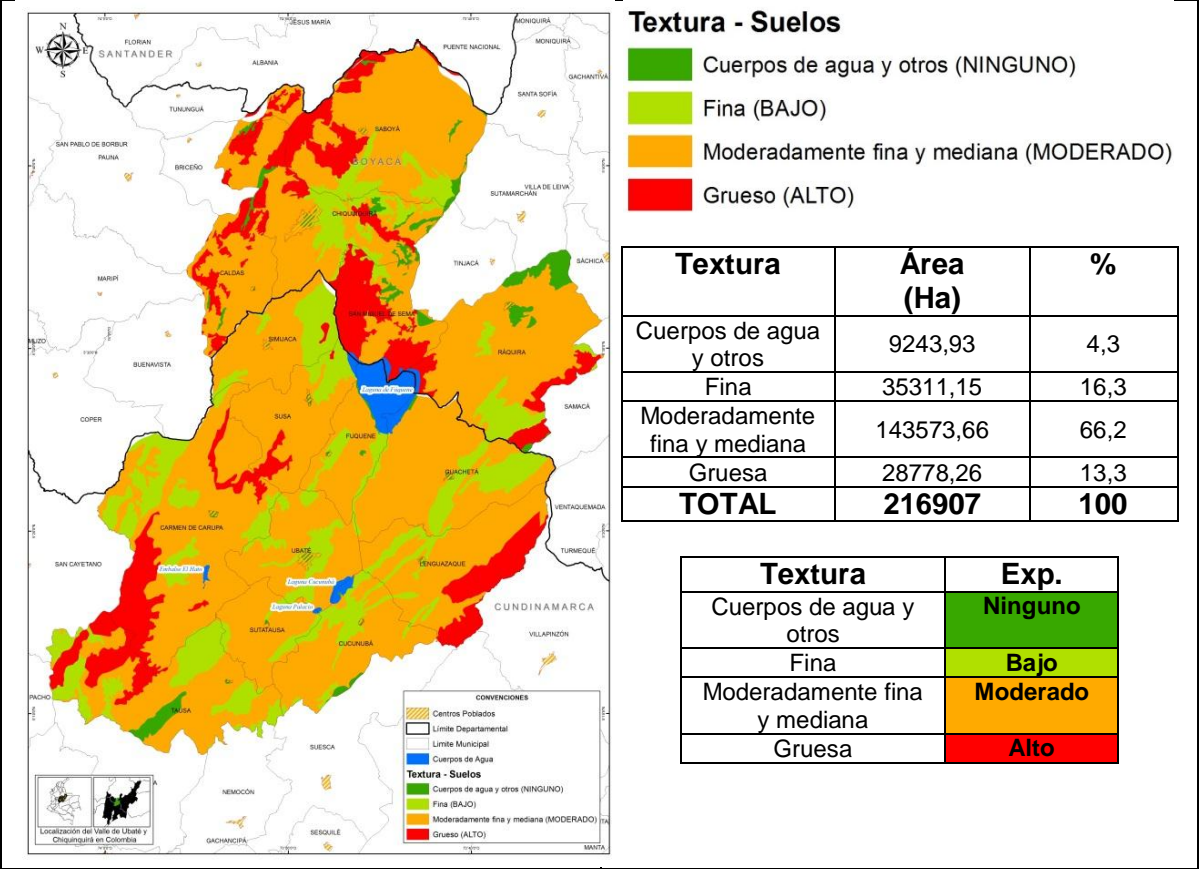
Los suelos de texturas franco limoso arcilloso, franco arenoso arcilloso y franco arcilloso (ni gruesas ni finas), con una calificación de moderado, dominan ampliamente la mayoría del territorio de la región, con un área de 143576,66 Ha, equivalente al 66,2%.

La textura gruesa, con una calificación de alto imperan en los municipios de San Miguel de Sema, Lenguaque, Carmén de Carupa, y en menor proporción en Chiquinquirá,



Caldas entre otros. El área cuyo suelo presenta esta textura es de 28778 Ha, equivalente a un 13,3% de toda la región.

**Figura 4-19:** mapa de textura de los suelos y calificación de la exposición con respecto a la textura en el valle de Ubaté y Chiquinquirá.



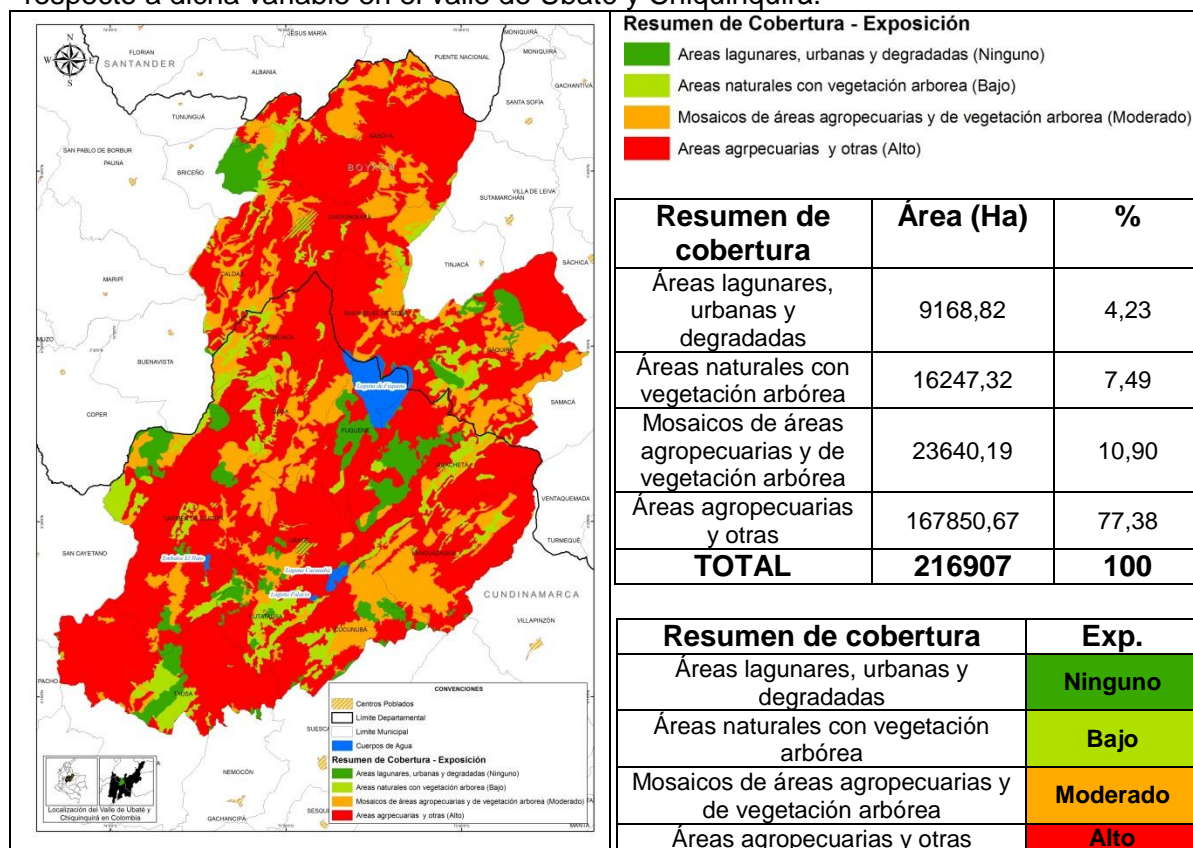
• **Cobertura**

La vegetación de gran altura, densidad y grosor (bosques densos naturales y plantados, arbustos y matorrales), calificada en grado de exposición **Bajo**, ocupa un área de 16247,32 Ha, equivalente al 7,49% de la región; se ubica en zonas altas de Fúquene, San Miguel de Sema y Chiquinquirá principalmente.

El grado de exposición **Moderado**, asignadas a coberturas de pastos, cultivos y espacios naturales ocupa un área de 23640,19 Ha (10,90%), abarcando diferentes porciones a lo largo del valle de Ubaté y Chiquinquirá.

La vegetación de páramo y subpáramo (por altura), los pastos limpios, pastos naturales, sabanas y otro tipo de vegetación con grado de calificación **alto**, abarcan un área aproximada de 167850,67 Ha (77,38%), siendo la categoría más importante en la región.

**Figura 4-20:** mapa de cobertura y uso del suelo y calificación de la exposición con respecto a dicha variable en el valle de Ubaté y Chiquinquirá.



- **Cercanía a cuerpos de agua**

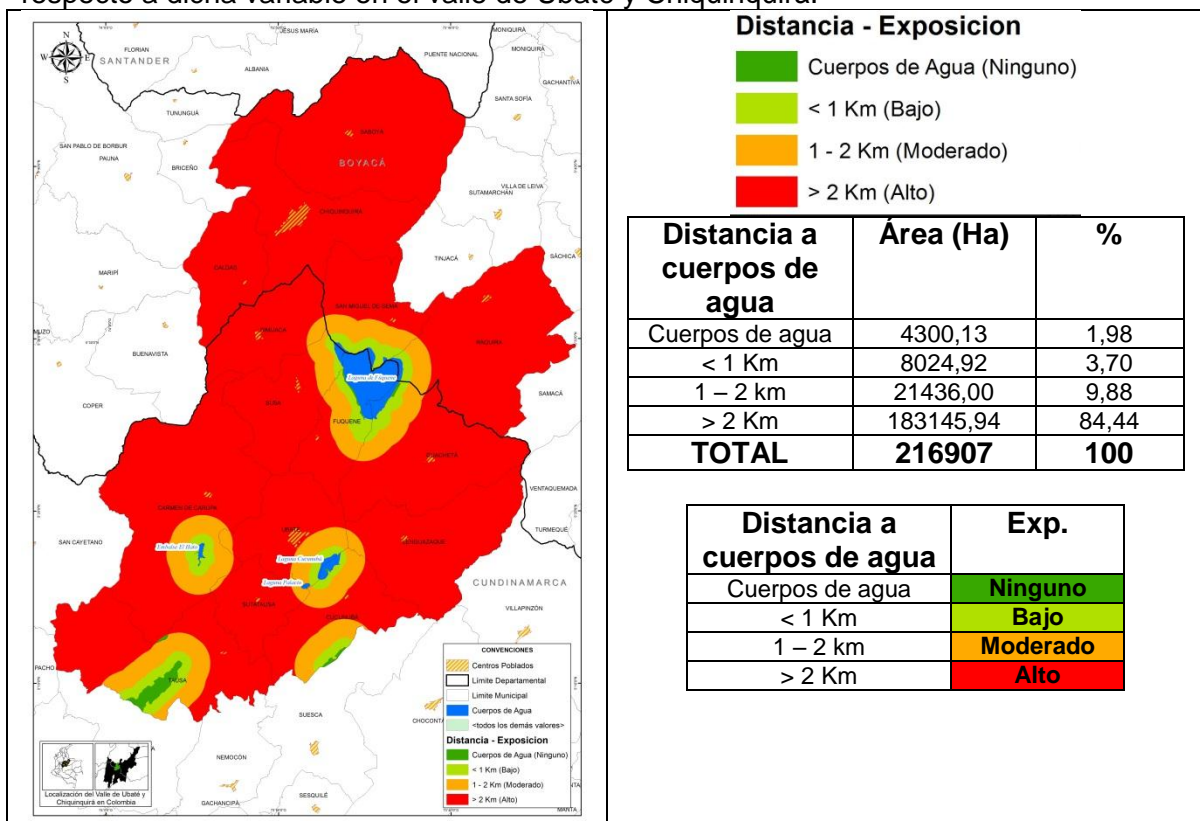
Como se observa en la fig. Figura 4-21, los cuerpos de agua presentes en la región son: laguna de Fúquene (mayor cuerpo de agua de la zona), embalse El Hato, laguna de Cucunubá, laguna Palacio, embalse del Neusa y embalse del Sisga, los cuales ocupan un área de 4300,13 Ha (1,98%), no presentando ninguna condición para el desarrollo heladas, por ser cuerpos de agua por lo que se les otorga un grado de exposición **Ninguno**.

Áreas con grado de exposición **Bajo** (distancias menores a 1 Km), ocupan un área de 8024 ha, equivalentes a un 3,7 %; de la misma forma, áreas con grado de exposición **Moderado** abarcan un área de 21436 ha (9.8%) El 84,4% de la unidad de análisis

(183145 Ha), presenta grado de exposición **Alto**, cubriendo prácticamente toda la región.

La utilidad de ésta variable debe ser discutida con mayor detenimiento en futuros estudios, debido a que en muchos lugares las áreas cercanas a los complejos lagunares resultan ser zonas inundables, que ante la ocurrencia de excesos de lluvias, resultan presentar grado de exposición alto a inundaciones y encharcamientos derivados de las precipitaciones. De la misma forma, la validación de las distancias propuestas deben ser sometidas a pruebas en campo, a través de ensayos experimentales que contribuyan a precisar los tramos por categorías.

**Figura 4-21:** mapa de cercanía a cuerpos de agua y calificación de la exposición con respecto a dicha variable en el valle de Ubaté y Chiquinquirá.



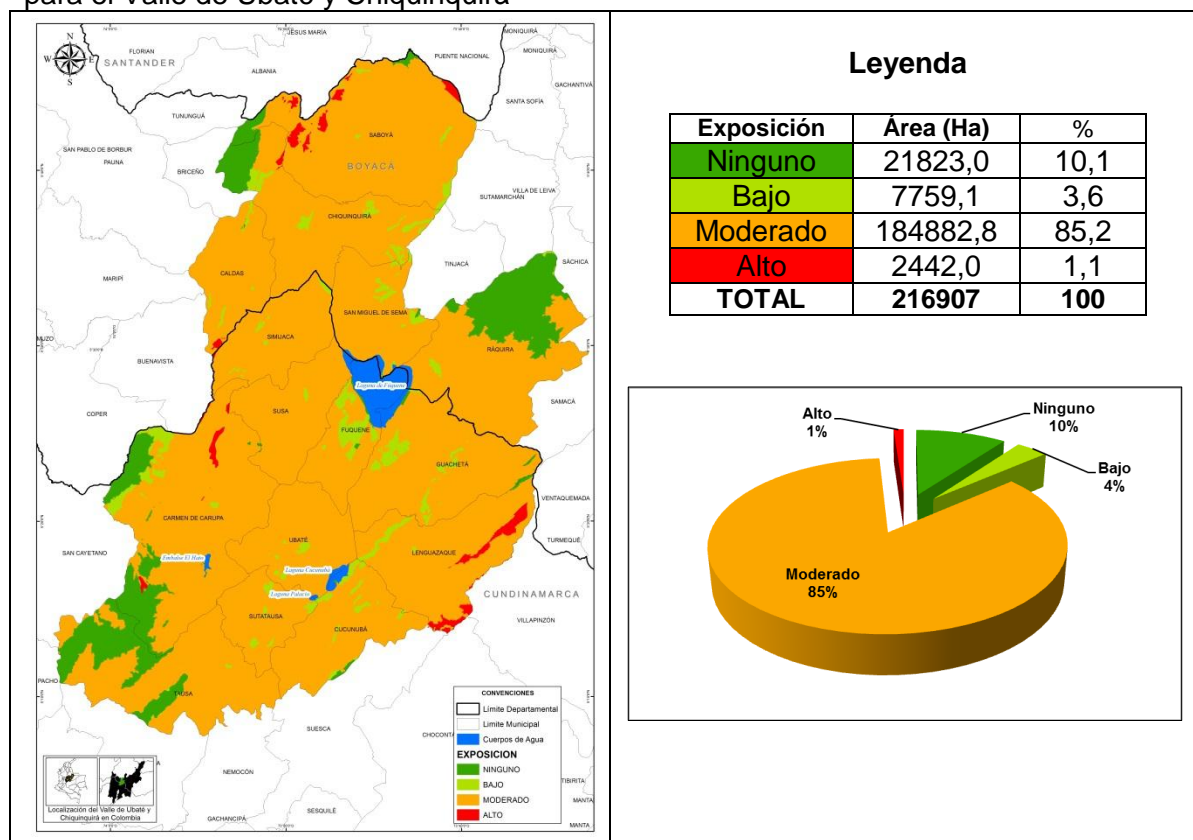
#### 4.3.2 Generación de las áreas de exposición a las heladas para el valle de Ubaté y Chiquinquirá

Las áreas de exposición fueron deducidas a partir del cruce de capas de las variables cuyas características favorecen la ocurrencia de enfriamiento y/o heladas. Dichas

variables, a diferencia de las climáticas, son consideradas estables en periodos cortos de tiempo, por lo que la salida cartográfica debe considerarse constante.

El cruce de la información fue realizado con la ayuda de un SIG, intersectando cada una de las variables tal como lo ilustra la **Figura 3-6**, siguiendo un orden jerárquico (características y cobertura del suelo con elevación).

**Figura 4-22:** mapa de áreas de exposición a las heladas a partir de variables biofísicas, para el Valle de Ubaté y Chiquinquirá



El mapa del grado de exposición a heladas (Figura 4-22), presento las siguientes características:

- El grado de exposición predominante (85,2%) a lo largo de la región fue **moderado** (184882,8 Ha) influenciado principalmente por: la cobertura del suelo, con grandes áreas dedicadas a la agricultura y pastoreo de animales, la textura del suelo, dominadas por estructuras gruesas (arenas) y contenido de materia orgánica y cercanía a los cuerpos de agua.

- El grado de exposición **bajo**, con un área de 7759,1 (3.6%) , se encuentra repartido en pequeñas zonas a lo largo de la región, determinado principalmente por el paisaje y la cercanía a los cuerpos de agua. Ésta calificación predomina principalmente en los municipios de Fúquene, Cucunubá y Ubaté.
- El grado de exposición menos predominante es **alto** con 2242,0 Ha (1,1%), cuyas zonas se encuentran ubicadas en los municipios de Saboyá, Lenguaque y Carmen de Carupa. Está calificación fue influenciada en general por todas las variables, ya que dichas zonas se encuentran lugares altos de planicies y valles, con una textura de suelos gruesa, y lejanos a la influencia de cualquier cuerpo de agua.
- Las zonas cuyo grado de exposición fue **ninguno**, correspondió a cuerpos de agua, zonas urbanas, tierras eriales o descubiertas y principalmente a elevaciones inferiores a 2500 msnm, calificado por el IDEAM como áreas sin ningún tipo de riesgo a la ocurrencia de heladas. El área cubierta por esta clasificación es de 21823 Ha (10.1%), correspondiente a la zona norte del municipio de Ráquira, oriente de Chiquinquirá y Carmen de Carupa y sur de Susa, específicamente zona de influencia del embalse del Neusa.

En general el grado de exposición de la zona a las heladas es moderado, por lo que algunas variables tales como: textura de los suelos, cobertura y cercanía a los cuerpos de agua, en gran parte de la región, favorecen las condiciones para el desarrollo y ocurrencia de dichos eventos extremos.

Por otro lado variables tales como: paisaje, elevación y pendiente, tienen características que inhiben las condiciones para el desarrollo del evento, por lo que es recomendable que en futuros trabajos se cuantifique el porcentaje de aporte de cada variable a la ocurrencia de dichos eventos.

## 4.4 Caracterización y pronóstico de las heladas en el altiplano Cundiboyacense

### 4.4.1 Caracterización de las heladas

Cuando se habla del término “helada” alude a una temperatura mínima menor o igual a 0°C a un nivel de 2 metros sobre la superficie del suelo, altura reglamentaria de una caseta meteorológica, por lo que la caracterización de las heladas tomo como punto de partida la temperatura mínima (temperatura mínima crítica), en la que eventualmente puede haber un daño al sistema de producción lechero, ya sea directamente a la especie forrajera predominante en la zona (Kikuyo *Pennisetum clandestinum*), o a la fisiología de la vaca. El kikuyo suele presentar sensibilidad extrema a temperaturas menores de 0°C, generando pérdidas en la producción lechera (Marquinez Casas, 2001).

A continuación se presentan los resultados de la caracterización de las heladas a partir de la metodología de (Fernandez Long & Barnatán, 2011).

- **Época**

La determinación de la época de ocurrencia de heladas tiene una alta importancia para la planeación y ejecución de actividades esencialmente agrícolas, ya que puede proyectarse de manera idónea los ciclos de los cultivos, evitando así que en épocas de mayor sensibilidad los sistemas productivos se puedan ver afectados. Los cultivos más pequeños pueden presentar mayor afectación, ya que el mayor descenso de temperatura se presenta a poca altura del suelo, por lo que una temperatura menor de -3°C (heladas fuertes), a nivel de caseta meteorológica, afecta considerablemente dichos cultivos, logrando causar estragos no sólo en cultivos o plantas de poca altura, sino también en árboles y frutales (Boshell J. F., 1998).

Como parte esencial de la caracterización, se planteó una clasificación que tratara de reflejar el comportamiento de la temperatura mínima desde el punto de vista de la severidad de la helada y su afectación al sistema productivo, por lo que a los rangos descritos por Boshell (1998) (elaborando una clasificación de acuerdo a las temperaturas que pueden ocasionar daños a los tejidos de la planta, proponiendo lo siguiente: **entre -2°C y -1°C**, heladas de baja intensidad; **entre -3°C y -2°C**, heladas de mediana intensidad; por debajo de **-3°C**, heladas de alta intensidad), fue necesario adicionar a la

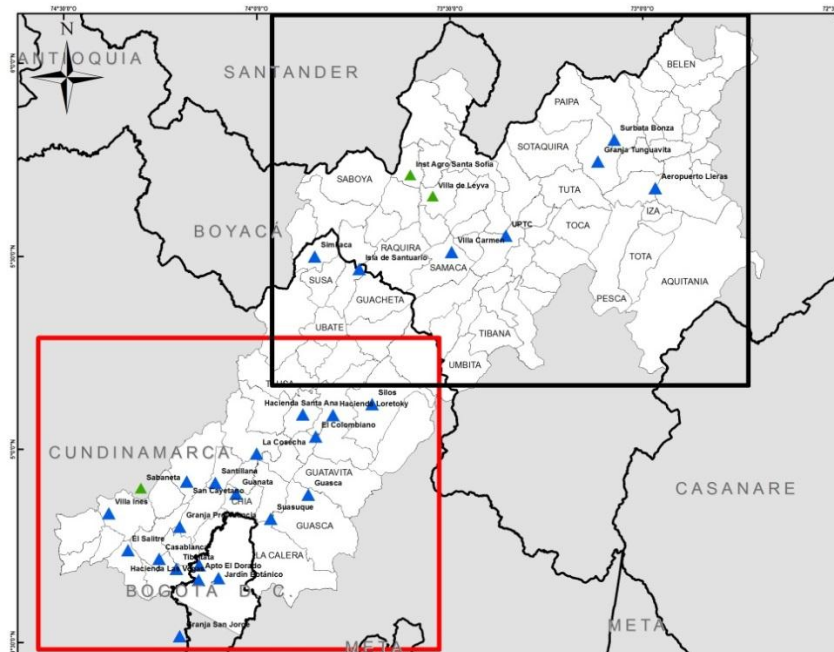


clasificación el intervalo **-1°C y 0°C** (entre -1°C y 0°C), para incluir todos aquellos registros que cubrieran dicho intervalo. Además se incluyó el intervalo de **0°C a 2°C**, ya que en ocasiones la helada meteorológica viene precedida de enfriamientos, los cuales aunque parezcan no tener el carácter de helada, pueden afectar cultivos sensibles a bajas temperaturas; dicho análisis se encuentra contenido en el anexo G. La Tabla 4-1 muestra la clasificación propuesta, describiendo cada rango de temperatura de acuerdo a la afectación.

**Tabla 4-1:** clasificación de las heladas propuesta por rangos de temperatura

Clasificación	Rango de temperaturas	Descripción
Enfriamiento	0°C a 2°C	Debido a que algunas especies vegetales muestran alta sensibilidad a las bajas temperaturas, y sabiendo que a nivel del suelo la temperatura suele ser menor que a la altura de caseta meteorológica, se estableció el rango de enfriamiento (que en éste caso no es asumido como helada).
Helada entre ligera y moderada	-3°C a 0°C	Cuando la temperatura desciende por debajo de los 0° C puede catalogarse como helada, pero dicho rango de temperatura no tiene una afectación a todos los sistemas productivos
Helada Severa	Menor a -3°C	Las heladas severas, menores a -3°C, se refieren a temperaturas que afectan la totalidad de los sistemas de producción y en algunos casos vegetación de gran tamaño.

**Figura 4-23:** ventanas de trabajo en el altiplano Cundiboyacense, donde se observan las estaciones utilizadas para el cálculo de la frecuencia relativa de las heladas.

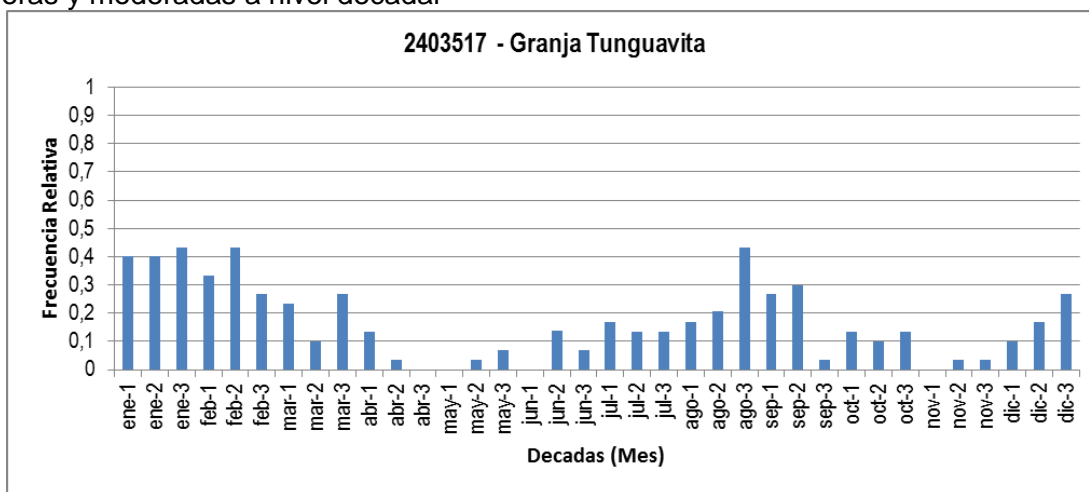


El cálculo de la frecuencia relativa de los eventos: enfriamientos, heladas ligeras a moderadas y heladas severas, permitió conocer la probabilidad de ocurrencia en cada área de influencia de cada estación meteorológica a nivel decadal. En la Figura 4-23 se observan las estaciones utilizadas para el análisis; el triángulo de color azul indica lugares donde se presentan por lo menos enfriamientos, mientras el color verde señala lugares donde no se presentan heladas.

El marco negro define la ventana de trabajo que comprende el valle de Ubaté y Chiquinquirá y valle del Chicamocha, mientras la ventana roja el área asociada a la sabana de Bogotá.

A manera de ilustración del análisis, la Figura 4-24 muestra que la mayor probabilidad de ocurrencia de heladas entre ligeras y moderadas (0 a  $-3^{\circ}\text{C}$ ) en la estación Granja Providencia se da en los meses de enero, febrero y agosto, con un valor de 0.4, mientras que para otros meses la probabilidad disminuye; no obstante éste tipo de eventos puede presentarse en cualquier época del año, salvo algunas décadas de los meses de abril, mayo y noviembre donde la probabilidad es nula.

**Figura 4-24:** gráfico de frecuencia relativa de la estación Granja Tunguavita en el municipio de Paipa (Boyacá), mostrando la probabilidad de ocurrencias de heladas entre ligeras y moderadas a nivel decadal

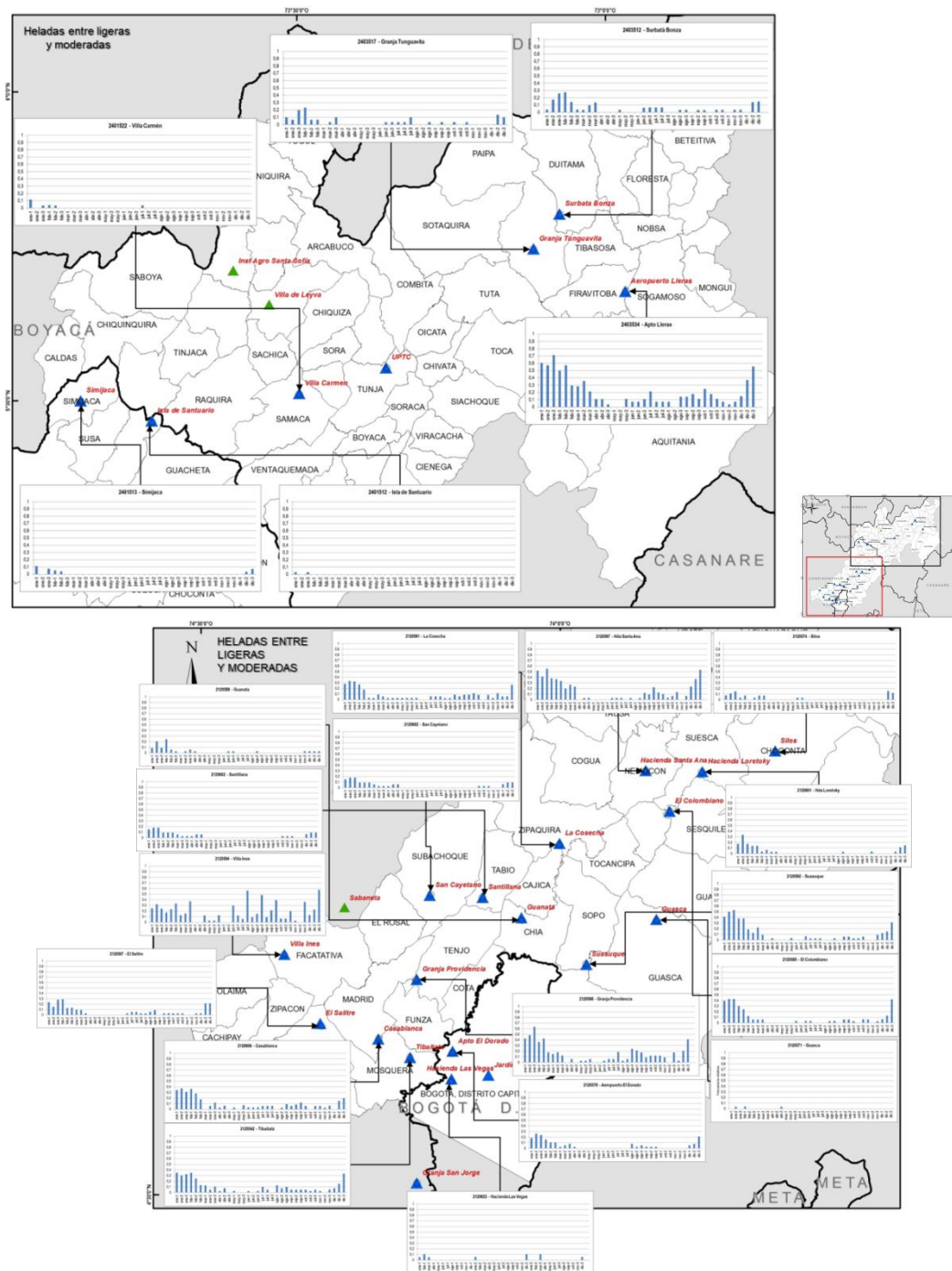


El análisis de las heladas entre ligeras y moderadas ( $0^{\circ}\text{C}$  a  $-3^{\circ}\text{C}$ ), mostró q la probabilidad de ocurrencia ostensiblemente disminuyó (Figura 4-25), o en algunos casos



desapareció tal como las estaciones San Jorge (Soacha) y UPTC (Tunja), ampliando el detalle de las épocas donde suelen presentarse éstos eventos.

**Figura 4-25:** gráficos de frecuencia relativa de las heladas entre ligeras y moderadas a lo largo del altiplano Cundiboyacense. Arriba se observan estaciones pertenecientes al valle de Ubaté y Chiquinquirá y valle del Chicamocha; abajo se observan las estaciones pertenecientes a la sabana de Bogotá



En general las mayores probabilidades disminuyeron considerablemente, oscilando entre 0 y 0.4, estaciones como Apto Lleras (Sogamoso), Granja Providencia (Tenjo), Suasuque (Sopo), Hacienda Santa Ana (Nemocón), entre otros mostraron valores entre 0.4 y 0.7 de probabilidad, pero a diferencia de los enfriamientos, dichos valores sólo se concentraron en los meses de diciembre, enero y febrero y junio, julio y agosto para Santa Ana (Nemocón), dejando las otras épocas con valores de probabilidad no mayores a 0.2. La presencia de un evento ENSO/El Niño, sea débil moderado o fuerte, puede influir para que dichas zonas sean más vulnerables a éste tipo de heladas, debido principalmente a la ausencia de humedad en la zona y exceso de radiación.

Por otro lado dichos eventos pueden producirse en cualquier época del año, pero sus probabilidades no suelen ser tan altas, implicando que dichos eventos suelen producirse debido a condiciones sinópticas que pueden alterar el comportamiento en un corto periodo de tiempo provocando los descensos de la temperatura.

Prácticamente en el valle de Ubaté y Chiquinquirá, región objeto de análisis en éste documento, las heladas entre ligeras y moderadas suelen ser muy escasas, salvo el mes de enero, cuya probabilidad no sobrepasa 0.1, ello obedece a que la zona no muestra tener un grado de exposición alto (paisaje, cercanía a cuerpos de agua, entre otros), o al emplazamiento de las estaciones que no muestran la realidad climática de la zona.

Finalmente, las heladas severas suelen ocurrir en el mismo periodo donde principalmente se presentan las heladas entre ligeras y moderadas, en los meses de diciembre, enero y febrero o primera temporada seca, por lo que define ésta época como la de mayor amenaza ante estos eventos. Sin embargo, los valores de probabilidad no sobrepasaron 0.2, salvo Apto Lleras (Sogamoso), donde el valor de probabilidad fue casi 0.3, por lo que se concluye, que no es muy común que se presenten heladas severas, salvo en algunos periodos donde eventos de variabilidad climática como El Niño más fases subsidentes de la MJO, influyan en las condiciones climáticas de la precipitación y nubosidad que fuercen a la temperatura mínima para que disminuya de modo tal que se presente una helada o varias heladas de éste tipo, así como ocurrió en febrero de 2007 donde hubo una seguidilla de estos eventos (Mayorga, González, & Hurtado, 2008).



Por lo demás varias estaciones como Isla de Santuario (Fúquene), Simijaca (Simijaca), La Cosecha (Zipaquirá), Guanatá (Chía), entre otros, la ocurrencia de éste tipo de heladas prácticamente ha sido nula.

El Anexo G contiene la totalidad de los gráficos de frecuencia relativa de cada estación.

- **Intensidad**

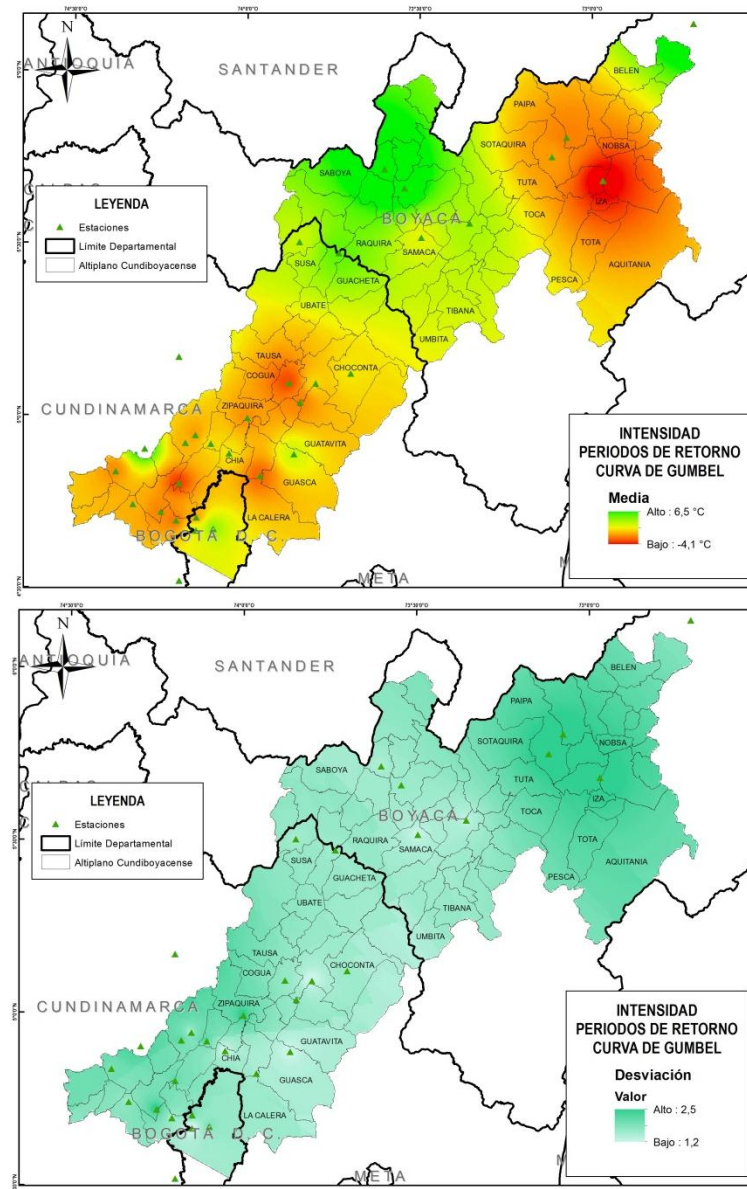
La caracterización obedeció a determinar los valores más intensos probables que ocurren y pueden llegar a ocurrir a lo largo del altiplano Cundiboyacense. Como punto de partida se seleccionó el registro de temperatura mínima más bajo en el año, también llamado temperatura mínima absoluta, calculando así el valor medio y la dispersión de la serie (desviación estándar).

En la Figura 4-27 se observa que la temperatura mínima media absoluta varía ampliamente a lo largo de la zona, con un valor mínimo de  $-4.1^{\circ}\text{C}$  (color rojo) ubicado en la región del valle del Chicamocha, municipios de Sogamoso, Duitama, Paipa entre otros, mientras que valores un poco más altos (rojos y anaranjados) predominaron en el altiplano Cundiboyacense, cuyos valores promedio oscilaron entre  $-3^{\circ}\text{C}$  y  $0^{\circ}\text{C}$ .

Por otro lado, el valle de Ubaté y Chiquinquirá mostró una temperatura mínima media absoluta más alta que las otras dos regiones, con valores que oscilaron entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $4.0^{\circ}\text{C}$ . El valor máximo de  $6.5^{\circ}\text{C}$  ubicado en el municipio de Santa Sofía (estación Instituto Agrícola), se encuentra en el lado noroccidental del altiplano, cuyo comportamiento es influenciado principalmente por el valle del Magdalena.

Las series mostraron que los mayores valores de dispersión (valor máximo de  $2.5^{\circ}\text{C}$ ), son localizados en zonas donde la temperatura mínima media absoluta es menor (valle del Chicamocha y sabana de Bogotá), mientras los menores valores (valor mínimo de  $1.2^{\circ}\text{C}$ ), se localizan en zonas donde se encontraron los mayores valores de temperatura mínima media absoluta (valle de Ubaté y Chiquinquirá), mostrando que la variabilidad de los datos se encuentra indiscutiblemente atada a la oscilación de la temperatura mínima, la cual para estos lugares tiende a ser grande.

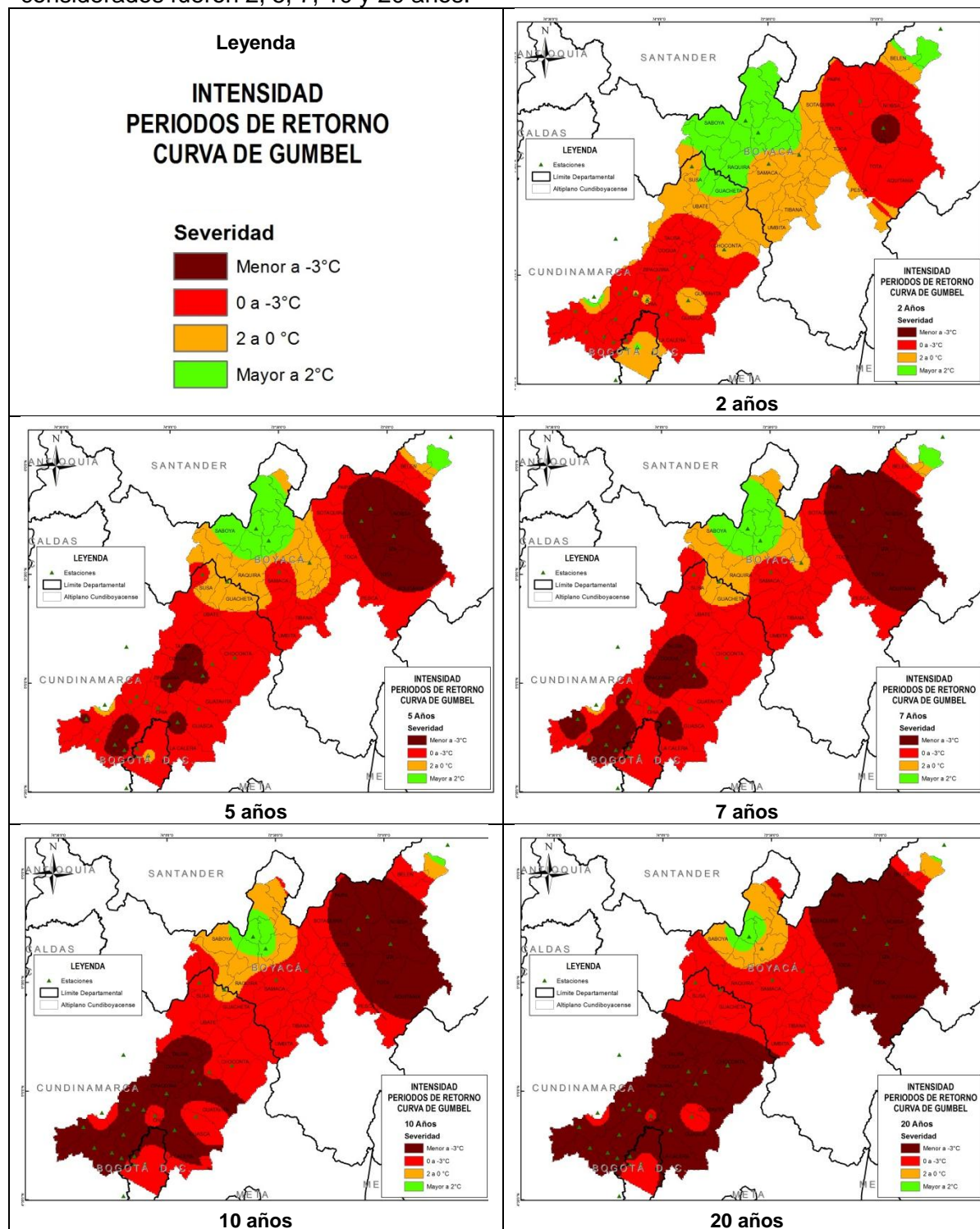
**Figura 4-27:** mapa de temperatura mínima media absoluta anual (arriba) y de dispersión de las series de tiempo (abajo) deducido a partir del cálculo de la desviación estándar en el altiplano Cundiboyacense.



Para conocer los valores más intensos, probables que ocurren o pueden ocurrir en diferentes lapsos de tiempo, se utilizó la curva de distribución de Gumbel, con la cual se ajustó individualmente cada serie, en diferentes periodos de retorno. Los periodos calculados correspondieron a 2, 5, 7, 10 y 20 (Anexo H), cuyos valores fueron interpolados para conocer espacialmente el comportamiento



**Figura 4-28:** distribución espacial de los periodos de retorno de la temperatura mínima absoluta anual, a nivel del altiplano Cundiboyacense. Los periodos de retorno considerados fueron 2, 5, 7, 10 y 20 años.



La Figura 4-28 muestra los mapas de periodos de retorno de temperatura media mínima absoluta anual para el altiplano Cundiboyacense, cuya leyenda se basó en el rango de clasificación de las heladas, dando como resultado que:

- Para un periodo de **2 años** los valores de retorno en el norte valle del Chicamocha y la sabana de Bogotá se encuentran en el rango de 0°C a -3°C (heladas entre ligeras y moderadas), mientras el oriente y sur del valle de Ubaté y Chiquinquirá y sur del valle del Chicamocha predominan los enfriamientos (0°C a 2°C). En el centro y norte del valle de Ubaté y Chiquinquirá se caracteriza por la inexistencia de temperaturas que generen un enfriamiento o helada. Un rasgo importante identificado en el municipio de Sogamoso (valle del Chicamocha), es que su estación Aeropuerto Lleras, muestra temperaturas de retorno menores a -3°C, con lo que se concluye que en la zona tienden a presentarse episodios de heladas severas las cuales ocurren por lo menos cada dos años, catalogándose como la zona de mayor amenaza.
- Los periodos de retorno a **5 y 7 años** muestran espacialmente la misma configuración, reflejando episodios de heladas severas para el norte del valle del Chicamocha con los municipios de Sogamoso, Duitama, Paipa entre otros y sabana de Bogotá, especialmente en el norte de la zona destacándose los municipios de Zipaquirá, Nemocón, Cogua, Sopo, Guasca y en el occidente con Tenjo, Mosquera, Madrid, Facatativá entre otros. En el valle de Ubaté y Chiquinquirá se observan que la intensidad de los episodios varía entre enfriamientos en el centro y norte de la región y heladas entre ligeras y moderadas en el sur, en los límites con la sabana de Bogotá.
- El periodo de retorno a **10 años** tiende a mostrar la misma configuración espacial que los periodos de retorno a **5 y 7 años**, con una diferencia marcada en el cambio de clasificación de algunas estaciones en la sabana de Bogotá como son las de los municipios de Subachoque, Tabio y Cajicá, pasando de heladas entre ligeras y moderadas a heladas severas.

- El periodo de retorno a **20 años** mostró que la sabana de Bogotá y norte del valle del Chicamocha, probablemente presente valores por debajo de  $-3^{\circ}\text{C}$ , heladas severas, a excepción de algunos municipios tales como Guasca y Chía que junto con el centro y norte del valle de Ubaté y Chiquinquirá mostrarían valores entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $-3^{\circ}\text{C}$ , ubicándose en la clasificación de heladas entre ligeras y moderadas.

Los periodos de retorno mostraron como en diferentes lugares del altiplano pueden presentarse varios niveles de intensidad, traducido ello, en la escala de severidad de los eventos (enfriamiento, heladas entre ligeras y moderadas y heladas severas), por lo que puede concluirse que: el valle del Chicamocha y en menor proporción la sabana de Bogotá, muestran un mayor grado de amenaza que el valle de Ubaté y Chiquinquirá, ya que en periodos de retorno de tan sólo dos años, la primera región puede presentar valores por debajo de  $-3^{\circ}\text{C}$ , mientras que el valle de Ubaté y Chiquinquirá no sobrepasa de enfriamientos ( $0^{\circ}\text{C}$  a  $2^{\circ}\text{C}$ ), por lo que para los pastos tales como el kikuyo supone una amenaza más grande ubicarse en inmediaciones del Chicamocha que en Ubaté y Chiquinquirá.

- **Duración**

La duración de la helada es quizás la característica más compleja de medir, debido a que ésta se mide en horas, y la disponibilidad de estaciones que midan los parámetros en dicha escala de tiempo es muy reducida. Las estaciones utilizadas en la red hidrometeorológica nacional poseen las horas de lectura recomendadas por la organización meteorológica mundial (OMM), 7:00 Hs, 13:00 Hs y 19:00 Hs, por lo que no es posible realizar dicho seguimiento. Por otro lado la red automática de monitoreo, con datos disponible desde el año 2005, presenta una densidad muy baja de estaciones por lo que los resultados se muestran a manera de ejemplo en sólo 3 estaciones, aclarando que faltan más zonas donde determinar la duración de helada.

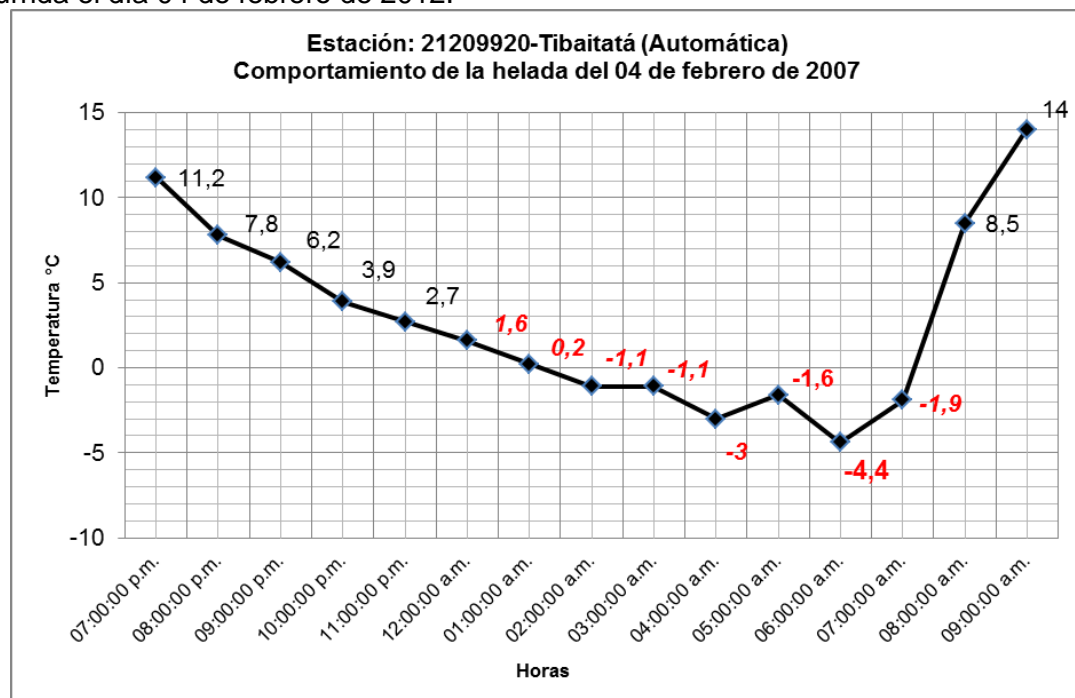
En promedio una helada en el altiplano Cundiboyacense (en general para el trópico alto andino), puede tener una duración entre una hora y cerca de cinco o seis horas aproximándose el momento de la ocurrencia de la temperatura mínima con el momento de la salida del sol (Boshell J. F., 1998).



En la Figura 4-29 se puede apreciar lo ocurrido el 04 de febrero de 2007, donde se presentó una helada de categoría severa; la temperatura cayó hasta el nivel de enfriamiento aproximadamente a la medianoche (12:00 a.m.), con un valor de 1.6°C, decreciendo hasta la categoría de helada entre ligera y moderada entre la 1:00 a.m. y 2 a.m. con un valor de -1.1 °C. La helada severa se dio aproximadamente a las 4:00 a.m. con un valor de -3°C, manteniéndose en esta categoría hasta las 6:00 a.m. donde alcanzó la temperatura mínima de -4.4°C. A la salida del sol la temperatura tuvo un rápido incremento, pasando a -1.9°C a las 7:00 a.m., 8.5°C a las 8:00 a.m. y 14°C a las 9:00 a.m., lo que afirma que la temperatura mínima absoluta se presentará entre las 4:00 a.m. y las 6:00 a.m.

En general la hora de comienzo y fin del enfriamiento y/o helada se da aproximadamente entre las 11:00 p.m. y las 2:00 a.m., finalizando entre las 7:00 a.m. y 8:00 a.m. tal como se describe en la Figura 4-29.

**Figura 4-29:** evolución de la temperatura mínima para la descripción de la helada severa ocurrida el día 04 de febrero de 2012.

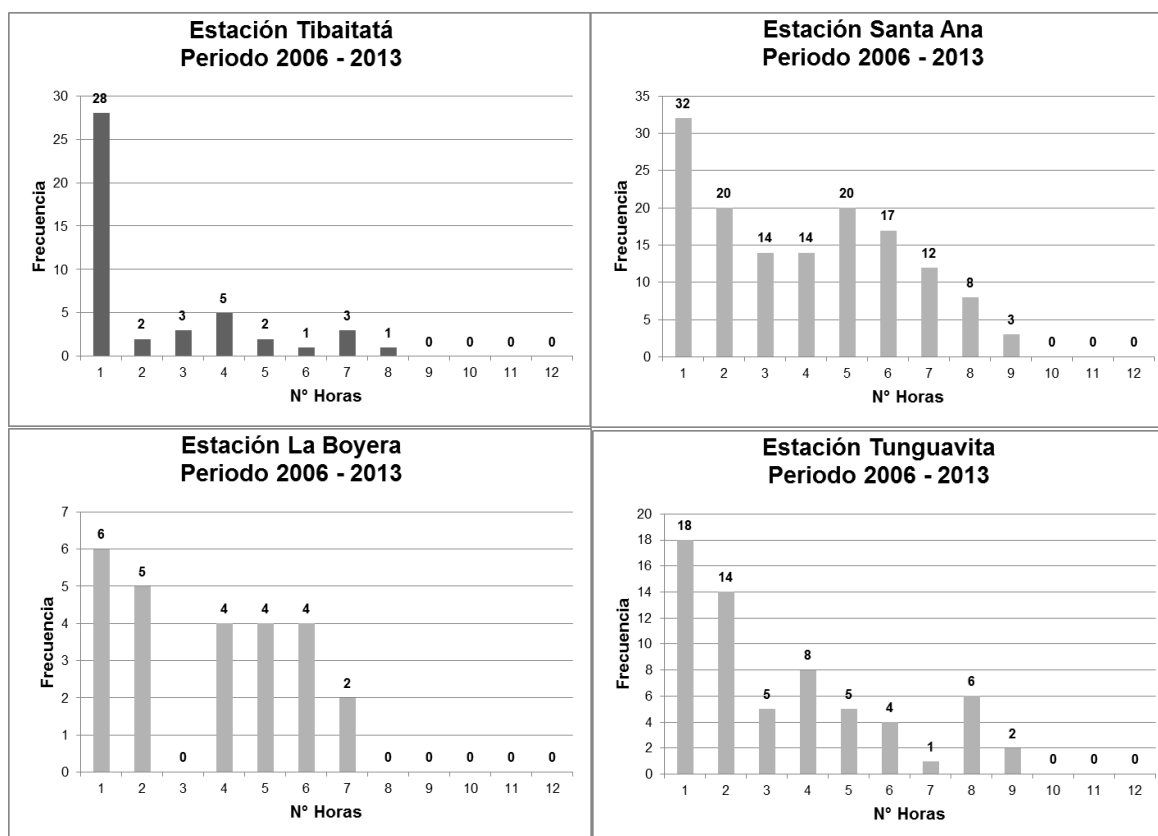


La velocidad de congelación y descongelación puede ser considerado como un factor de gran importancia a la hora evaluar el deterioro en la planta, ya que si éstos se dan muy

rápidamente, pueden ocasionar daño irreversible al interior de la hoja, causando estragos en la actividad intracelular, alterando el protoplasma, lugar donde se desarrollan los procesos más importantes de la célula, tales como el metabolismo y la reproducción (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

Otro factor a la hora de evaluar el daño en una planta es el tiempo de exposición a la temperatura crítica, por lo que Artunduaga (1980) señala que existen algunas plantas que mueren sólo al exponerlas a su valor crítico, mientras otras deben permanecer un tiempo prudencial para causar algún daño, aumentando éste según el tiempo de exposición. Por otro lado Snyder *et al.* (2010), señala que hay poca o ninguna evidencia que la duración del evento afecte al daño, estableciendo de por sí que el daño por congelación al parecer es independiente del tiempo para periodos cortos, como son los que ocurren con las heladas de radiación.

**Figura 4-30:** histograma de frecuencia horarias de heladas (incluyendo enfriamientos), en cuatro estaciones de la red automática en el altiplano Cundiboyacense



A pesar que se planteen algunas discrepancias en dicho ámbito, se generó un histograma de frecuencia con algunas estaciones del altiplano Cundiboyacense que tuvieran mediciones a escala horaria y que los datos fueran consistentes, evaluando el ciclo diario de la temperatura. La determinación del número de horas de duración del evento consistió en realizar el conteo a partir de los 2°C de límite de temperatura, considerando al enfriamiento como parte del evento.

El resultado obtenido (Figura 4-30), mostró que la mayoría de casos estos eventos no sobrepasan la hora, por lo que el tiempo de exposición de las plantas a un enfriamiento o helada puede manejarse con métodos sencillos, o simplemente ubicando los cultivos en lugares de poco grado de exposición a las heladas.

Analizando la configuración de cada histograma, se observa que la duración de los enfriamientos y/o heladas en la estación Tibaitatá oscila entre 1 y 8 horas, siendo más frecuentes los episodios de 1 hora. Así mismo en las estaciones Santa Ana y Tunguavita, la duración de los eventos oscila entre 1 y 9 horas mientras para La Boyera no sobrepasa las 7 horas.

- **Tipo de helada**

El tipo de helada influye mucho en la elección de los métodos de protección ya que se debe realizar una planificación con el objetivo de contrarrestar los efectos de las mismas (Fernandez Long & Barnatán, 2011), pero debido a la ubicación tropical del país, donde es inexistente la invasión de masas de aire frías procedentes de las regiones polares, las cuales pueden durar estacionadas durante muchas horas en una zona, por todo lo anterior puede concluirse que en las zonas alto-andinas de Colombia sólo se presente un el tipo de helada, la de radiación.

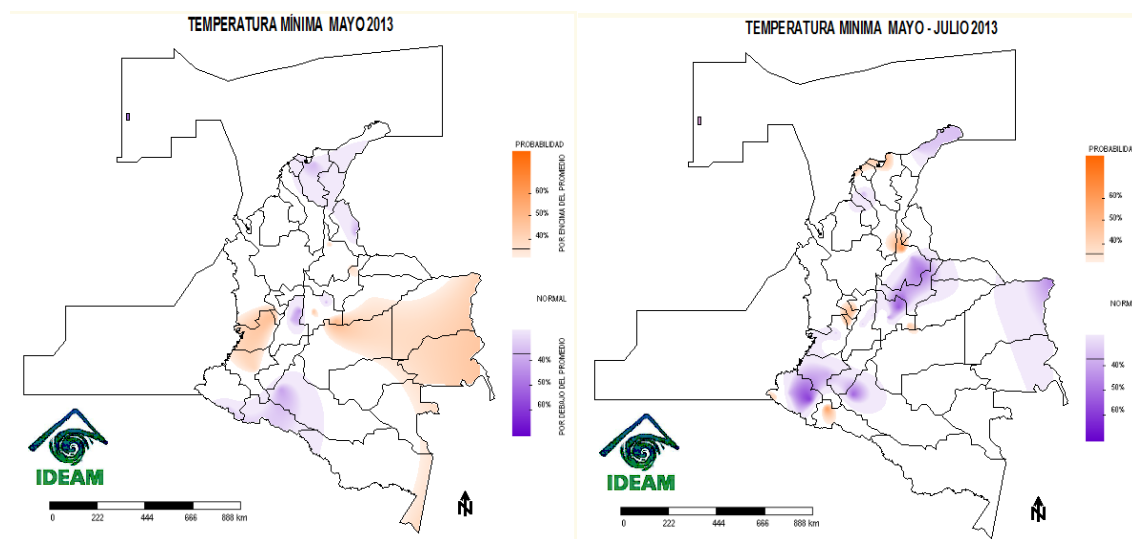
#### **4.4.2 Pronóstico de las heladas**

El pronóstico en general, pero para éste caso de heladas, implica adelantarse al evento para así poder contrarrestar sus efectos. Las herramientas empleadas en los pronósticos, cuyo objetivo es de servir de apoyo al proceso de toma de decisiones para así disminuir las pérdidas económicas, específicamente, en el sector agropecuario, dependen mucho de que tan acertado es su resultado ya que si se adelantan opciones de manejo y/o

protección cuando el evento no sucede, puede conducir a pérdida o mal aprovechamiento de recursos.

En Colombia, el IDEAM intenta realizar el pronóstico de la temperatura mínima a través de modelos dinámicos y/o estadísticos, pero estos generalmente tienen una resolución espacial pequeña que reduce notablemente los detalles de la zona. En la Figura 4-31 se observa cómo el IDEAM realiza la predicción estadística de la temperatura mínima para todo el país, mostrando zonas cuyo comportamiento se encuentran por encima de lo normal, dentro de lo normal y por debajo de lo normal.

**Figura 4-31:** predicción climática de la temperatura mínima en Colombia, para el mes de mayo (Izquierda) y trimestre mayo, junio y julio (derecha) de 2013, hecho a través de análisis de correlación canónica. Fuente: IDEAM (2013) <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/1696> [Consultado: Mayo de 2013]



Además de la problemática de la resolución espacial en la predicción climática, se observó también que la utilización de la temperatura mínima como variable de análisis, implicando un problema ya que no es posible pronosticar el número de eventos (Nº de heladas) por ocurrir, por lo que la severidad del periodo quedará prácticamente descartada.

- **Predicción de las heladas y evaluación del grado de amenaza para el altiplano Cundiboyacense**

Ante el problema planteado, la caracterización de las heladas brinda una base sólida para una eficaz predicción, ya que fortalece inmejorablemente la capacidad de respuesta de los agricultores, Es por ello que a través del análisis compuesto se analizó la importancia de la relación entre los ENSO y el número de heladas ocurridas, tomando sus resultados como elemento de predicción.

Dicha relación debió ser ajustada de modo que: sirviera como variable de cálculo del riesgo agroclimático, enfocado en la frecuencia de ocurrencia de las heladas, por lo que se realizó el diseño de una evaluación donde fuera necesario generar una escala que pudiera valorar el grado de amenaza, reflejando el peligro que puede representar el incremento en el número de heladas.

El resultado del diseño de la evaluación se traduce en la Tabla 4-2, donde se describe la clasificación de la amenaza climática, adaptada de Ycaza *et al.* (2009), donde se da prioridad a los valores **sobre lo normal**, ya que si se presentan valores por debajo de lo normal (menos heladas), ello no se traduciría en amenaza, como si puede pasar cuando se analiza otras variables como la precipitación o la temperatura.

Como aspecto para destacar en la calificación, se observa que el grado de amenaza **Normal** y **Bajo** presentan el mismo valor, ello debido a que la caracterización (sección 4.4.1) arrojó que a lo largo del año, algunas regiones del altiplano Cundiboyacense pueden presentar heladas, así que si se calcula el riesgo agroclimático con una calificación de 0 para un grado de amenaza **Normal**, sencillamente no existiría riesgo, resultado que sería erróneo.

**Tabla 4-2:** clasificación de la amenaza ante la ocurrencia en el número de heladas

Rango (Sobre lo normal)	Amenaza	Calificación
Menor a 10 %	Normal	1
Entre 10% y 20%	Bajo	
Entre 20% y 30%	Moderamente Bajo	2
Entre 30% y 40%	Medio	3
Entre 40% y 50%	Moderamente Alto	4
Mayor al 50 %	Alto	5

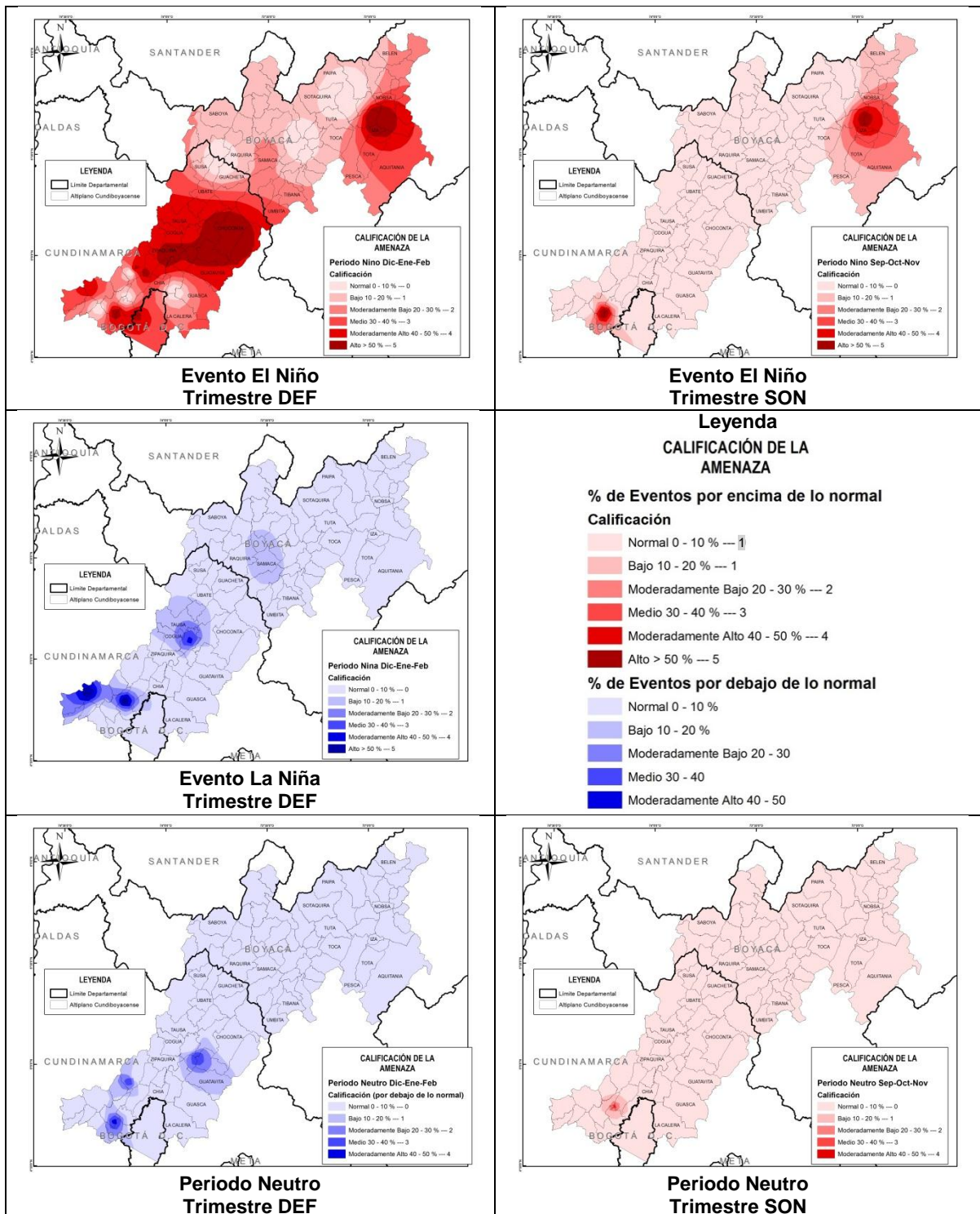
Realizando el cálculo del grado de amenaza por cada trimestre, se pudo identificar lo siguiente:

- Los trimestres marzo, abril y mayo (MAM) y junio, julio y agosto (JJA) ante la influencia de un evento El Niño y La Niña, presentan completa normalidad en el número de heladas ocurridas. Así mismo, en el trimestre septiembre, octubre y noviembre (SON), ante la influencia de un evento La Niña, presenta normalidad en el número de heladas ocurridas.
- Ante la influencia de un evento El Niño, el trimestre diciembre, enero y febrero (DEF), muestra un incremento en la ocurrencia de heladas. En el norte del valle del Chicamocha, en el municipio de Sogamoso (Estación Apto. Lleras), se observa un aumento de los eventos en más del 50% de los casos, así como en el norte y occidente de la sabana de Bogotá, en municipios como: Sopo, Chocontá, Zipaquirá, Mosquera entre otros, a los que se catalogó como grado de amenaza **ALTO**.

El valle de Ubaté y Chiquinquirá y región centro sur del valle del Chicamocha el grado de amenaza se ubicó entre **BAJO** y **NORMAL**, así como algunos municipios de la sabana de Bogotá como La Calera, Tenjo, Facatativa, entre otros.

- El trimestre SON presenta dos puntos con grado de amenaza entre **MEDIO**, **MODERADAMENTE ALTO** y **ALTO**, ubicados en los municipios de Sogamoso y Duitama en el valle de Chicamocha y Mosquera, Madrid y Funza en la sabana de Bogotá; el resto de área que comprende el altiplano Cundiboyacense presenta un grado de amenaza **NORMAL**.
- Ante la influencia de un evento La Niña, el número de heladas muestra una tendencia a estar dentro de lo **NORMAL**, a excepción del trimestre DEF, donde lugares como los municipios de Cogua, Zipaquirá y Facatativa en la sabana de Bogotá, el número de heladas tiende a estar por debajo de lo normal. Un comportamiento similar puede identificarse en el periodo neutro (sin ENSO), para el mismo trimestre.

**Figura 4-32:** relación entre los eventos ENSO y el número de heladas por trimestre



- En el trimestre SON ante un periodo neutro, la tendencia del número de heladas es a comportarse dentro de lo normal, a excepción del municipio de Tenjo, donde el grado de amenaza se encuentra entre **BAJO** y **MODERADAMENTE BAJO**

- **Pronostico de las heladas para el valle de Ubaté y Chiquinquirá**

Aunque el resultado de la caracterización de las heladas arrojó que el valle de Ubaté y Chiquinquirá posee un menor grado de amenaza que otras zonas del altiplano Cundiboyacense, no puede descartarse que dicho evento pueda ocurrir, por lo que es necesario establecer algún tipo de metodología o prueba que permita generar un pronóstico de modo sencillo y confiable.

Generalmente los pronósticos de corto plazo son los que mejores resultados brindan, por lo que existen grandes posibilidades de acierto y verificación de los resultados, sin embargo los servicios meteorológicos no lo hacen para lugares específicos, si no para regiones en general (altiplano Cundiboyacense, Nariño, Antioquia entre otros), donde la escala sinóptica y/o de meso-escala dicta algunas directrices para la predicción de una helada de radiación, a partir de datos locales (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

Diversos autores han intentado generar modelos de micro-escala o escala local a partir de cálculos de balance de energía, concluyendo que “las temperaturas del aire no pueden predecirse con satisfacción a partir de únicamente del balance de energía en la superficie, incluso estableciendo con precisión las diferencias entre las temperaturas de la superficie y del aire”, debido principalmente a la dificultad de la medida de: flujo de calor sensible turbulento en las noches de helada, la advección y las variaciones espaciales, ya que estos factores dependen de la tasa de enfriamiento de la columna de aire, siendo imposible su medición (Kalma J. D., Laughlin, Caprio, & Hamer, 1992).

En Colombia, León *et al.* (2004), generaron un software de pronóstico de la temperatura mínima para Bogotá, exactamente para la estación Aeropuerto El Dorado, cuya metodología relaciona la temperatura y la humedad medidos en la columna vertical del aire, y los datos modelados por el HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) del ARL (Air Resources Laboratory) de la NOAA, encontrando un patrón de coincidencia. La gran limitación de éste modelo es la incapacidad de utilizarse

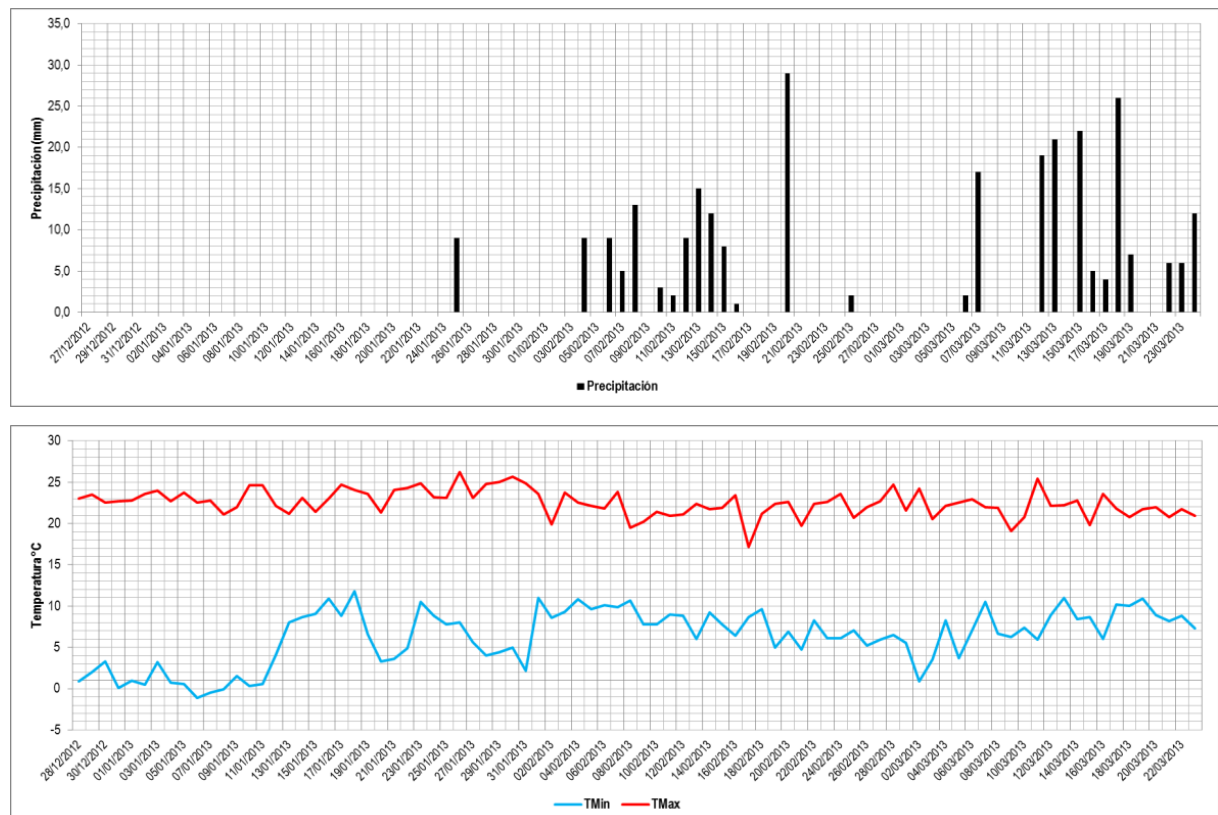


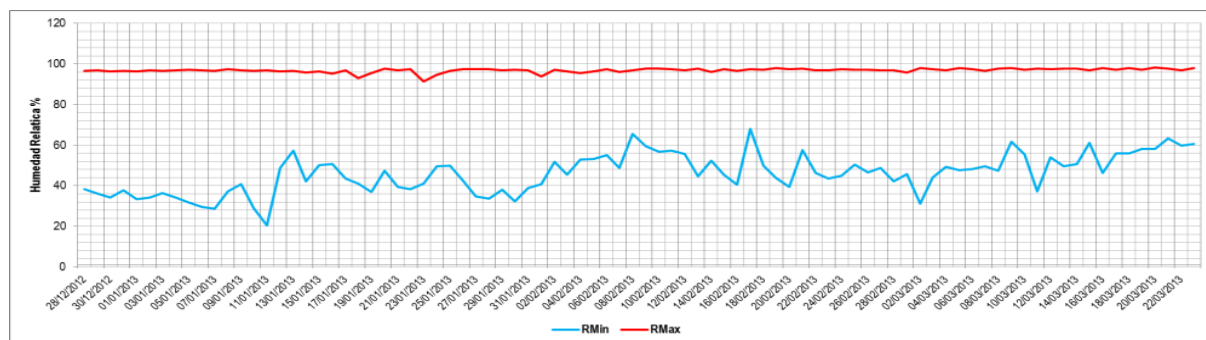
en otro punto, debido a la medición de los datos de la columna de aire, obtenidos a partir del radio sondeo realizado en el Aeropuerto El Dorado de Bogotá.

- **Generalidades en la aplicación del modelo**

La aplicación del modelo empírico de Allen (Allen, 1957), implementado en el Frost Forecast (FFST) (Snyder & de Melo-Abreu, 2010), en el pronóstico de heladas para el valle de Ubaté y Chiquinquirá permitió el uso de una herramienta, cuya manipulación es relativamente sencilla, además que permite una calibración sencilla y de fácil adaptación a condiciones locales, adquiriendo un rol de importancia para su posterior implementación en sistemas de alerta temprana.

**Figura 4-33:** precipitación (arriba), temperatura mínima-máxima (medio) y humedad relativa mínima-máxima (abajo) de la estación Recuerdo-Chiquinquirá. Periodo: 28/Diciembre/2012 – 22/Marzo/2013.





Como ya se indicó anteriormente (Cap.3), se utilizó la información de la estación de monitoreo de apoyo (Recuerdo Chiquinquirá), para realizar el monitoreo y posterior calibración del modelo de pronóstico. El periodo de información utilizado abarcó desde el 28/Diciembre/2012 hasta el 22/Marzo/2013 ya que el fin de la medición fue realizar un monitoreo al comportamiento de la temperatura (temperatura mínima) y generar los datos necesarios para calibrar el modelo FFST.

**Tabla 4-3:** correlación de las variables climáticas monitoreadas en la estación Recuerdo-Chiquinquirá.

Correlación	Pp	T (20Hrs)	R (20Hrs)	Td (20Hrs)	Tn Día sig	Tx	Tn	R Max	R Min
Pp	1								
T (20Hrs)	0,07	1							
HumRel (20Hrs)	0,29	0,10	1						
Td (20Hrs)	0,23	0,74	0,74	1					
Tn Día sig	0,25	0,53	0,67	0,81	1				
Tx	-0,24	0,14	-0,22	-0,05	-0,16	1			
Tn	0,38	0,40	0,65	0,70	0,72	-0,25	1		
R Max	0,15	-0,12	0,09	-0,02	0,07	-0,26	-0,22	1	
R Min	0,31	0,20	0,58	0,52	0,60	-0,73	0,70	0,18	1
<b>P_Value&lt;0.01</b>									
Pp	NA								
T (20Hrs)	0,54	NA							
HumRel (20Hrs)	0,01	0,36	NA						
Td (20Hrs)	0,03	0,00	0,00	NA					
Tn Día sig	0,02	0,00	0,00	0,00	NA				
Tx	0,02	0,20	0,04	0,63	0,16	NA			
Tn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72	0,02	NA		
R Max	0,16	0,28	0,40	0,82	0,07	0,01	0,04	NA	
R Min	0,00	0,06	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,09	NA

La Figura 4-33 resume las condiciones climáticas del periodo monitoreado, donde hubo 25 días de lluvia. A partir del 4 de febrero hasta el 20 de febrero se presentaron lluvias

sucesivas, casi de día por medio, con un máximo de 28 mm para el último día, bajando el volumen a cero, para luego continuar el día 7 de marzo hasta el corte del periodo. En los días sin lluvia tanto en el mes de enero como en el intervalo del 20 de febrero al 7 de marzo se presentaron las menores temperaturas mínimas, con un valor mínimo absoluto de  $-1.1^{\circ}\text{C}$  el día 5 de enero de 2013, periodo en el cual la humedad relativa mínima tuvo los menores valores también, presentando una correlación significativa de 0.7 ( $P\_Value < 0.01$ ).

- **Calibración y resultados**

La calibración tomó los registros históricos de la temperatura del aire y del punto de rocío dos horas después de la puesta del sol (8:00 PM para el Valle de Ubaté y Chiquinquirá) así como la temperatura mínima observada durante la helada con cielo despejado con anterioridad las 8:00 PM es el momento en que la radiación neta es negativa hasta el amanecer del día siguiente. Es importante incluir sólo las noches con las condiciones anteriormente descritas, así se evita la sobre estimación de las temperaturas mínimas (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

Por otro lado, en la Tabla 4-3 se observa la correlación de los valores de temperatura del aire ( $T$ ) y temperatura del punto de rocío ( $T_d$ ) a las 20 Hs (8:00 PM) que en conjunto con la temperatura mínima ( $T_n$ ) presentaron una correlación significativa (0.53 y 0.81 respectivamente) en los datos obtenidos del monitoreo, lo que supone que éstas variables tenidas en cuenta por Allen(1957) explican en buena medida el comportamiento de la temperatura mínima del día siguiente.

**Tabla 4-4:** resultados del modelo FFST, obtenidos del proceso de calibración.  $T_n$ : Temperatura mínima observada;  $T_p'$ (°C) Temperatura de la predicción, sin tener en cuenta la temperatura del punto de rocío dos horas después de la puesta del sol ( $T_d$ );  $T_p$ (°C) temperatura mínima predicha teniendo en cuenta la temperatura del punto de rocío dos horas después de la puesta del sol ( $T_d$ ).

Fecha	Observaciones dos (2) horas después de la puesta del sol		Temperatura mínima observada	Temperatura de la predicción	Residuales	Residuales del punto de rocío	Temperatura mínima predecida	Temperatura residual
	Temperatura	Punto de rocío	$T_n$ (°C)	$T_p'$ (°C)		$R1'$	$T_p$ (°C)	$T_n - T_p$ (°C)
DD/MM/AAAA	$T$ (°C)	$T_d$ (°C)	$T_n$ (°C)	$T_p'$ (°C)	$R1 = T_n - T_p'$	$R1'$	$T_p$ (°C)	$T_n - T_p$ (°C)
27/12/2012	9,7	6,5	0,9	0,2	0,7	0,0	0,3	0,6
28/12/2012	11,3	7,7	2,0	0,8	1,2	0,3	1,0	1,0
30/12/2012	10,7	6,6	0,1	0,6	-0,5	0,1	0,6	-0,5
31/12/2012	13,0	7,5	1,0	1,4	-0,4	0,2	1,6	-0,6
01/01/2013	10,6	5,7	0,5	0,6	-0,1	-0,1	0,5	0,0
03/01/2013	9,9	6,5	0,7	0,3	0,4	0,0	0,4	0,3
04/01/2013	9,7	5,9	0,6	0,2	0,4	-0,1	0,2	0,4
05/01/2013	10,2	5,2	-1,1	0,4	-1,5	-0,2	0,2	-1,3
06/01/2013	9,2	4,3	-0,5	0,1	-0,6	-0,3	-0,3	-0,2
07/01/2013	10,6	4,8	-0,1	0,6	-0,7	-0,3	0,3	-0,4
08/01/2013	10,6	4,6	1,5	0,6	0,9	-0,3	0,3	1,2
09/01/2013	9,5	6,5	0,3	0,2	0,1	0,0	0,2	0,1
10/01/2013	11,2	7,5	0,6	0,8	-0,2	0,2	1,0	-0,4
01/03/2013	11,2	8,3	0,9	0,8	0,1	0,4	1,1	-0,2

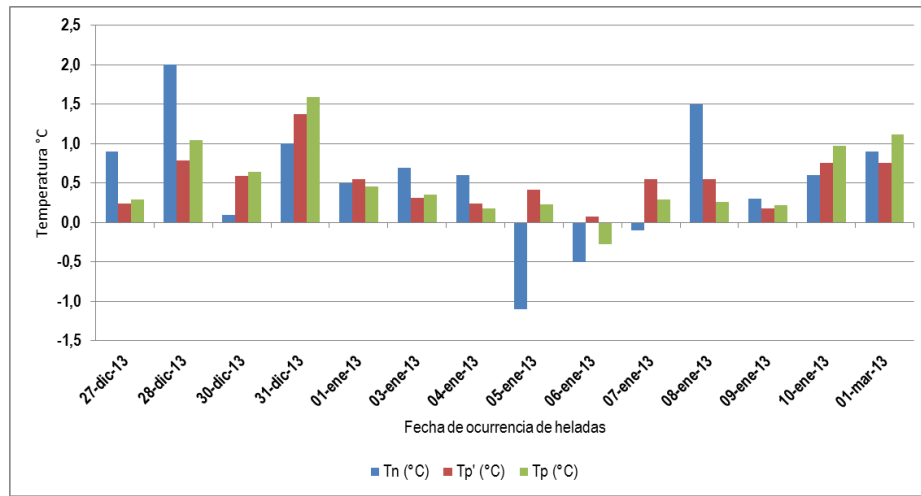
La calibración del modelo FFST en la estación Recuerdo-Chiquinquirá, presentó las siguientes ecuaciones:

$$T_p' = 0.341 T_o - 3.060 \quad (4.1)$$

$$T_p = 0.341 T_o + 0.176 T_d - 4.163 \quad (4.2)$$

Los resultados de la calibración mostrados en la Tabla 4-4 revelaron cierta habilidad del modelo para determinar el pronóstico de la temperatura mínima. Utilizando 14 datos que concordaron con las condiciones pedidas para la calibración, visualmente (Figura 4-34) se observa que las estimaciones realizadas por el modelo no fueron del precisas ya que en 5 de las 14 oportunidades subestimo el resultado, mientras en el resto lo sobre estimo.

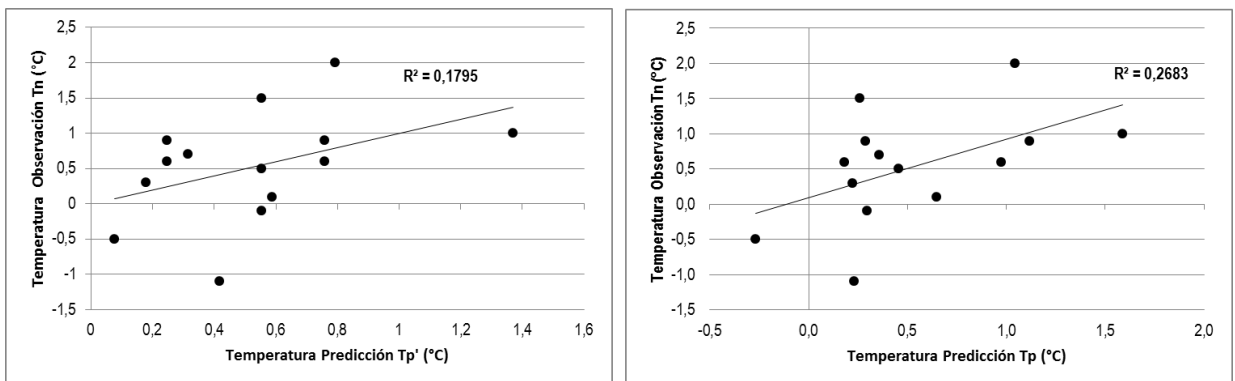
**Figura 4-34:** resultados del pronóstico del modelo FFST sin tener y teniendo en cuenta la temperatura del punto de rocío Td de las 22Hs con respecto a las observaciones.



Para la revisión del resultado del pronóstico se utilizaron algunas medidas estadísticas que describen el origen del error del pronóstico, si éste es de naturaleza sistemática y puede ser corregido o si por el contrario es aleatorio, mostrando las inconsistencias del modelo.

Tal como lo describe la Figura 4-35, el pronóstico perfecto debería seguir la línea, pero en éste caso los valores se encuentran por encima y por debajo, por lo que la distancia de cada punto a la línea podrá determinar la magnitud del error del pronóstico (León Aristizabal, 2005).

**Figura 4-35:** gráfico de dispersión entre la observación y el pronóstico. A la derecha se utilizó la Td (22 Hs.), mientras a la izquierda sólo T.



La evaluación del pronóstico a partir de medidas estadísticas proporcionó una idea de que tan acertado es el resultado del modelo, por lo que el error medio cuadrático (RMSE), así como el error medio absoluto (MAE), mostraron que tan distante se encuentra la media de los valores pronosticados. El valor del error total representado por el RMSE para  $T_{p'}$  fue de  $0.68^{\circ}\text{C}$ , mientras para  $T_p$  fue de  $0.65^{\circ}\text{C}$ , lo que supone un comportamiento del pronóstico relativamente aceptable. Dichos valores podrían disminuir en la medida que se incluyan un mayor número de observaciones.

**Tabla 4-5:** resultados de las medidas de evaluación del pronóstico de la temperatura mínima en noches de helada para la estación Recuerdo-Chiquinquirá

<b>Medidas de evaluación del Pronóstico</b>	<b><math>T_{p'}</math></b>	<b><math>T_p</math></b>
<b>RMSE (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b> Error cuadrático medio	0,65	0,68
<b>MAE</b> Error absoluto medio	0,54	0,53
<b>BE</b> Error del sesgo	$6,8 \times 10^{-18}$	$6,5 \times 10^{-18}$
<b><math>\sigma</math></b> Desviación estandar	0,71	0,68

El resultado del MAE, el cual es menos sensible que el RMSE a los grandes errores, mostró que el error total estuvo por  $0.54^{\circ}\text{C}$  para  $T_{p'}$  y  $0.53^{\circ}\text{C}$  para  $T_p$ , indicando que la inclusión de la  $T_d$  a las 20Hs en la estimación de la temperatura mínima proporciona un mejor resultado, aunque éste sea muy leve.

En la medida del error sistemático se utilizó el error del sesgo (BE) el cual muestra que tan fiable es el modelo, de manera que para ambos casos ( $T_{p'}$  y  $T_p$ ) el valor es aproximado a 0, lo que evidencia un error sistemático muy bajo, por lo que se concluye que los errores del modelo tienen un carácter aleatorio o estocástico. La variabilidad del pronóstico, medido a partir de la desviación estándar ( $\sigma$ ) mostró valores de 0.71 y 0.68 para  $T_{p'}$  y  $T_p$  respectivamente, mostrando la contribución del error aleatorio al modelo.

Los resultados revelaron que a pesar que existe una alta correlación de las variables utilizadas en la generación del pronóstico de temperaturas mínimas para noches con

heladas, el valor del error total, cuya naturaleza es más de tipo aleatorio que sistemático, es considerado relativamente alto, pudiendo corregirse a medida que se ingresen más datos para la calibración, ya que como se indicó anteriormente el periodo de monitoreo no fue superior a tres meses.

Aunque la hora en qué se realiza el pronóstico (8:00 PM) aplicando el FFST.xls no es del todo adecuado para la difusión con productores y autoridades que pueden poner en marcha medidas apropiadas para combatir los efectos de la helada, cabe resaltar que para fines académicos y de línea metodológica los resultados del modelo se consideran adecuados y contundentes, por lo que se propone en estudios posteriores realizar ejercicios con datos de las 4 o 5 PM, tiempo prudencial para informar el pronóstico.

Finalmente los resultados generados de la modelación son considerados de forma preliminar, debido en gran parte a que el monitoreo realizado de la temperatura mínima presento pocos episodios de heladas, dificultando la calibración del modelo, por lo que el desarrollo, aplicación y resultados del ejercicio de modelación se presenta como una propuesta ante gremios de producción y centros de investigación para ser desarrollada por estos y ser complementada por las predicciones a escala nacional realizadas por el IDEAM.

## **4.5 Evaluación de la sensibilidad del sistema de producción lechero a las heladas, a través de modelos de simulación.**

### **4.5.1 Caracterización del sistema de producción**

La caracterización del sistema de producción estuvo sujeta a los resultados obtenidos de la entrevista aplicada a ocho productores, escogidos a criterio de la investigación, de manera que se abarcaran hatos de tamaño: pequeño mediano y grande , en la muestra escogida para la recolección de la información.

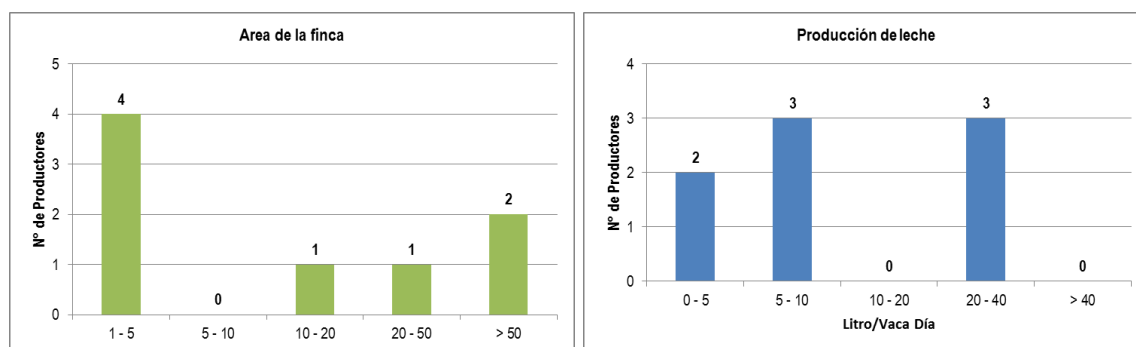
En la Figura 4-36 y Tabla 4-6, se describe los aspectos generales de la recolección de la información; de manera que: cuatro entrevistas se realizaron en fincas con áreas entre 1 y 5 ha, una entrevista a una finca con área entre 10 y 20 ha., una entrevista a una finca

con área entre 20 y 50 ha y dos entrevistas a fincas mayores a 50 ha. Entre 1 y 10 ha se consideran pequeñas fincas, con producciones no mayores a 10 l/vaca/día; entre 10 y 50 ha se consideran fincas de tamaño mediano, con producciones entre 10 y 20 l/vaca/día; mayores a 50 ha, se consideran grandes fincas, con producciones entre 20 y 40 l/vaca/día.

**Tabla 4-6:** características generales de las fincas en las cuales se aplicaron las entrevistas.

N°	Finca	Vereda	Municipio	Área de la finca (Ha)	
1	San Isidro	Peña Blanca	San Miguel de Sema	1 – 5	Pequeño
2	El Recuerdo	Arboledas	Chiquinquirá	1 – 5	Pequeño
3	Palmitas El Moral	Peña Blanca	San Miguel de Sema	1 – 5	Pequeño
4	Mata redonda	Balsa arriba	Chiquinquirá	1 – 5	Pequeño
5	Chizo	Arboledas	Chiquinquirá	10 – 20	Mediano
6	El Lago	Hato Viejo	San Miguel de Sema	20 – 50	Mediano
7	Miramar	El Charquito	San Miguel de Sema	> 50	Grande
8	Potossi	Sabaneca	San Miguel de Sema	> 50	Grande

**Figura 4-36:** datos generales de las fincas a las cuales se les aplicó la entrevista



De acuerdo a los resultados obtenidos de la aplicación de la entrevista, dos fincas producen menos de 5 l/vaca/día, tres fincas producen entre 5 y 10 l/vaca/día y las restantes entre 20 y 40 l/vaca/día (Figura 4-36).



Como se observa en la Tabla 4-6, las fincas más grandes tienen un mejor rendimiento productivo por vaca, que una finca pequeña, ello se debe a que las fincas grandes tienen hatos compuestos por razas puras especializadas en la producción de leche, en especial la raza holstein, mientras las pequeñas se componen de cruces de una menor productividad.

**Tabla 4-7:** descripción del componente animal para el valle de Ubaté y Chiquinquirá

N°	Finca	Tamaño del Hato (En producción)	Raza del Hato		Producción (l/vaca/día)
			Predominante	Secundario	
1	San Isidro	12	Cruces	-	0 - 5
2	El Recuerdo	2	Cruces	-	0 - 5
3	Palmitas El Moral	18	Cruces	-	5 - 10
4	Mata redonda	3	Cruces	-	5 - 10
5	Chizo	45	Holstein	Cruces	10 - 20
6	El Lago	100	Holstein	Normando	20 - 40
7	Miramar	80	Holstein	Normando	20 - 40
8	Potossi	250	Holstein	Normando y otras razas especializadas	20 - 40

La producción de leche del hato se encuentra muy influenciada por la calidad y disponibilidad de alimento, dado que éste provee de energía, proteínas y otros nutrientes indispensables para un adecuado proceso metabólico. Así mismo, los factores medio ambientales determinan en gran medida la calidad del alimento consumido por los animales, por lo que en la entrevista se indaga a los productores que tipo de pastura era la predominante en su finca como base para la alimentación del hato.

Como se aprecia en la Tabla 4-8, la pastura predominante en la zona es el kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), base fundamental en la alimentación de los bovinos, mientras otras pasturas como el ryegrass (*Lolium*) principalmente, son utilizadas en hatos de tamaño mediano y grande. De la misma forma, al indagar sobre el uso de suplementos alimenticios (otro tipo de especies forrajeras o productos procesados que

mejoren la productividad de los animales), sólo las fincas: El lago, Miramar y Potossi, usan algún tipo de producto como complemento alimenticio, ello atribuido principalmente al tamaño del hato y la exigente producción.

**Tabla 4-8:** descripción del componente de alimentación para el valle de Ubaté y Chiquinquirá

N°	Finca	Producción (l/vaca/día)	Pastura predominante	Uso de suplementos alimenticios
1	San Isidro	0 - 5	Kikuyo	NO
2	El Recuerdo	0 - 5	Kikuyo	NO
3	Palmitas El Moral	5 - 10	Kikuyo	NO
4	Mata redonda	5 - 10	Kikuyo	NO
5	Chizo	5 - 10	Kikuyo	NO
6	El Lago	20 - 40	Kikuyo Ryegrass	SI
7	Miramar	20 - 40	Kikuyo Ryegrass	SI
8	Potossi	20 - 40	Kikuyo Ryegrass	SI

#### 4.5.2 Modelación de producción lechera a nivel estacional

La experiencia en el ejercicio de simular los efectos de factores medio ambientales en la producción de leche en el país son pocos, debido principalmente a que la modelación requiere parámetros los cuales no están del todo determinados, además de la carencia de un modelo que integre todas aquellas variables determinantes, sin embargo se han utilizado modelos de regresión lineal que integran algunas variables.

La producción de leche es el resultado de una combinación de factores como el tipo de bovino (raza de la vaca), alimentación, manejo, medio ambiente entre otros, regulados por una serie de mecanismos enmarcados en un ciclo productivo, es por ello que el modelo utilizado intenta realizar la simulación para el estudio y la predicción de la producción de leche y cambio del peso de los bovinos a partir de: diferentes tipos de alimento (calidad), etapa de lactancia, variables climáticas como temperatura y velocidad

del viento, peso del animal entre otras, tomando en cuenta periodos de plena producción (Aguilar González, Allende Vargas, & Morales Juregui, 2004).

Los datos de entrada al modelo pueden dividirse en tres categorías: (1) fisiología del animal, (2) variables climáticas y (3) alimento. La Tabla 4-9 da la descripción de cada una de las variables incluidas.

**Tabla 4-9:** datos de entrada al modelo del sistema de producción de leche (Aguilar González, Allende Vargas, & Morales Juregui, 2004).

DATO	UNIDAD	ABV. Modelo	DESCRIPCION	VALOR
<b>Fisiología del animal</b>				
Peso promedio	Kg	<b>peso</b>	Se refiere al peso del bovino	400 <sup>1</sup>
Día de lactancia del animal	Día	<b>nlac</b>	Día de producción del animal. Se ajustó para la raza holstein en el valle de Ubaté y Chiquinquirá	1 – 300 <sup>2</sup>
Potencial productivo del animal	Kg/Lactancia	<b>pot</b>	Producción de leche del animal en todo el periodo de lactancia	4460 <sup>3</sup>
Largo pelo del animal	mm	<b>gr</b>	Longitud del pelo del animal	10 <sup>4</sup>
Radio del animal	mm	<b>rd</b>		400 <sup>4</sup>
<b>Variables Climáticas</b>				
Temperatura mínima	°C	<b>tmin</b>	Valor diario y/o promedio mensual	-
Temperatura máxima	°C	<b>tmax</b>	Valor diario y/o promedio mensual	-
Velocidad del viento	Km/h	<b>v</b>	Valor diario y/o promedio mensual	7.7
<b>Alimento</b>				
Concentración calorífica del forraje <i>Energía Metabolizable(EM)*</i>	Mcal/Kg MS	<b>dc</b>	Correspondiente al valor energético que puede contener el forraje	<b>Época Seca: 2.40</b> <b>Época Lluvia: 2.33</b>
Contenido de fosforo del alimento**	gr/Kg MS	<b>p</b>	Contenido mineral del forraje	<b>Época Seca: 2.24</b> <b>Época Lluvia: 2.08</b>
Contenido de calcio alimento**	gr/Kg MS	<b>Ca</b>		<b>Época Seca: 6.32</b> <b>Época Lluvia: 4.08</b>

<sup>1</sup>Peso promedio de Holstein adulto en producción en hatos del valle de Ubaté y Chiquinquirá (Colombia).

<sup>2</sup>Valor obtenido a partir de la curva de lactancia calculada para el valle de Ubaté (Área de influencia Estación Recuerdo-Chiquinquirá), equivalentes a 40 semanas aproximadamente

<sup>3</sup>Valor obtenido de la curva de lactancia para el valle de Ubaté (Área de influencia Estación Recuerdo-Chiquinquirá)

<sup>4</sup>Datos sugeridos por el modelo.

<sup>5</sup>Valores disponibles en el numeral 4.1

\*Valor de Energía Digestible (ED) obtenido de (Laredo & Mendoza, 1982), y ajustado a Energía Metabolizable (EM) en ganado de leche a través de la fórmula:  $EM \left( \frac{MCal}{kg} \right) = 0.93 * ED \left( \frac{MCal}{kg} \right) - 0.30$  (Laredo & Cuesta Peralta, 1988)

\*\* Valor de fosforo (P) y calcio (Ca) obtenido de (Laredo & Mendoza, 1983), ajustando el valor al % de utilización de los minerales por parte del animal el cual se encuentre en un 80% del total (Laredo, 1986)

La fuente de información provino de los resultados de la entrevista, específicamente se escogió la finca Chizo, con un hato compuesto por animales raza holstein en producción. La categoría de (1) *fisiología del animal*, contempló variables directas como: peso promedio, largo del pelo y radio del animal, e indirectas (que requieren algún tipo de cálculo) como el periodo de lactancia, potencial productivo y peso promedio del animal.

Las variables directas fueron determinadas para la raza holstein, mientras las indirectas fueron calculadas a partir de la deducción de la curva de lactancia de animales en plena producción todas de la finca Chizo.

La curva de lactancia que ajustó la producción potencial de leche en el modelo, no es más que una gráfica de representación, del tipo gamma incompleto, de la producción diaria o mensual, según sea los datos de análisis, en función del tiempo (Ossa S., Torregroza S., & Alvarado, 1997). A través de datos del periodo de lactancia (producción de leche en todo el periodo) en vacas de dos o más partos con un peso promedio de 400Kg para la zona, la curva mostró la siguiente ecuación:

$$Y_t = 14.94 * t^{0.28} e^{-0.038t} \quad (4.3)$$

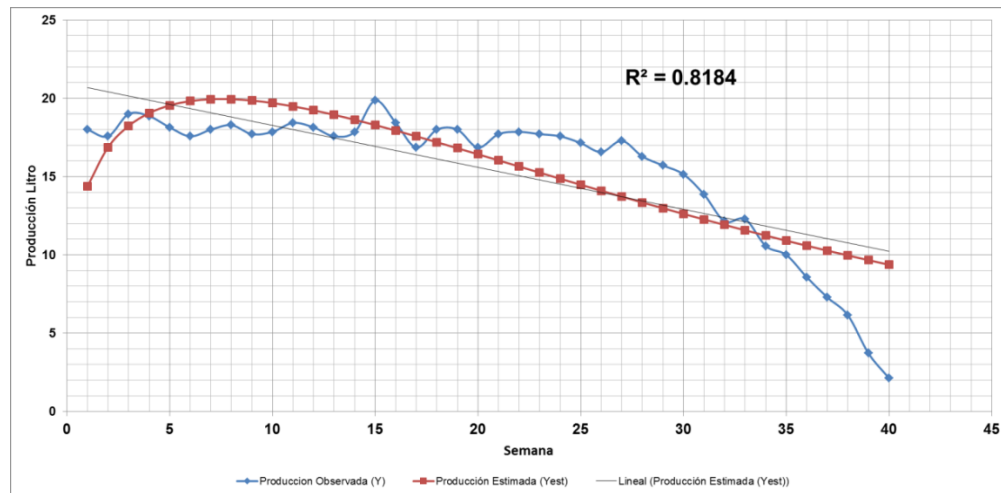
El ajuste de la curva, realizado a través del modelo propuesto por Wood (1967), encontró que el pico de producción se da alrededor de los 50 días del periodo de lactancia con una producción máxima de 20 litros por día. A partir de dicho momento, decreció lentamente la curva hasta llegar al día 285 con una producción de 9 litros por día (periodo de persistencia), momento en el cual el animal es inhibido de producir debido a la preparación previa que debe tener para un nuevo parto. Las otras variables de la categoría como **largo de pelo del animal** y **radio del animal** fueron tomadas por defecto del modelo.

Las *variables climáticas* fueron tomadas a partir de los datos mensuales multianuales periodo 1981 - 2010 de la estación Isla de Santuario.

En la categoría *Alimento*, variable de mayor sensibilidad en el modelo, se utilizaron los experimentos realizados en el valle de Ubaté y Chiquinquirá (Laredo & Mendoza, 1983), (Laredo & Mendoza, 1982) y (Laredo, 1986), donde determinaron elementos nutricionales

de la pradera kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) la cual es la planta forrajera de mayor predominio en zonas lechera de trópico alto (clima frío) en Colombia, incluido el valle de Ubaté y Chiquinquirá, según el resultado de las entrevistas practicadas

**Figura 4-37:** curva de lactancia para bovinos de dos o más partos para el valle de Ubaté y Chiquinquirá.



Aunque el modelo no tiene en cuenta el valor de la precipitación para realizar la simulación, ésta variable se encuentra incluida en los valores de EM y concentración de P y Ca, ya que fueron estimados para temporadas secas y de lluvia, por lo que es considerada como una variable indirecta en el modelo.

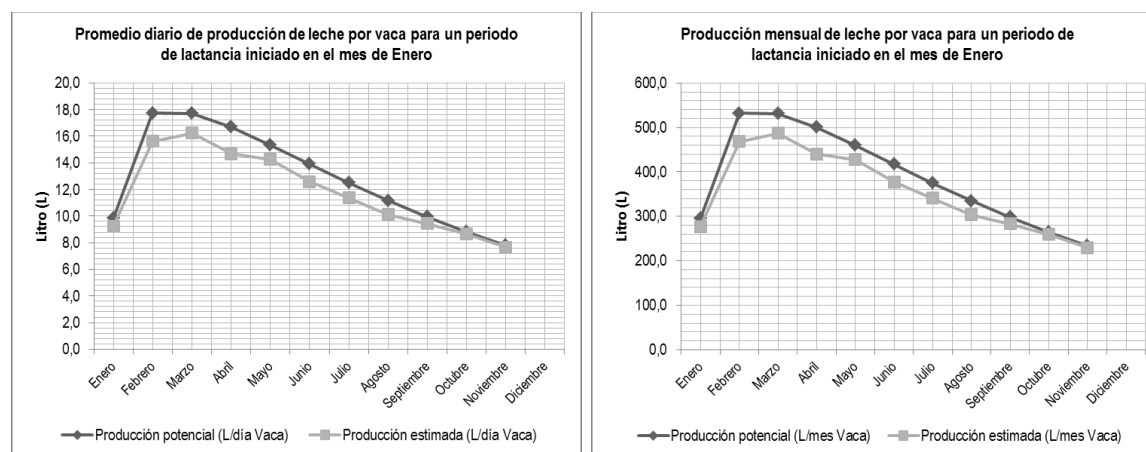
Debido a la disponibilidad de datos de *alimento* para temporada seca y lluviosa, se realizaron dos corridas del modelo, con el objetivo de verificar la diferencia entre el inicio del periodo de lactancia en condiciones secas, donde hay menor disponibilidad de forraje para el pastoreo (materia seca [Kg/ha Ms]), y en condiciones lluviosas donde hay mayor disponibilidad de forraje (materia seca [Kg/ha Ms]) (Laredo & Mendoza, 1982).

El punto de inicio de la primera corrida en la modelación fue el mes de enero, perteneciente al primer trimestre agroclimático del año o primera temporada seca (DEF), donde la producción promedio diaria de leche estimada para dicho mes fue de 9,3 l/vaca/día, siendo menor que la producción potencial con un valor de 9,8 l/vaca/día. La producción máxima estimada se dio a los tres meses del inicio del periodo de lactancia, con un promedio mensual diario de 16 l/vaca día, mientras la producción potencial se

ubicó en un valor de 17,7 l/vaca/día. El periodo de persistencia tuvo una tasa de caída mensual de 1,5 l/vaca.

Al final del periodo de lactancia (aproximadamente en 11 meses), el valor de la producción estimada fue de 7,7 l/vaca\*día, muy cercana a la producción potencial cuyo valor se ubicó en 7,8 l/vaca\*día (Tabla 4-7). La producción total mensual de leche por vaca estimada fue de 3870 Litros durante todo el periodo de lactancia, mientras la producción potencial total mensual de leche por vaca fue de 4242,3 Litros, lo que indicó una diferencia notable en su valor. En términos generales la producción potencial será siempre mayor a la estimada, ya que la potencial asume una plena alimentación del animal (Tabla 4-10)

**Figura 4-38:** producción promedio mensual y agregada mensual de leche por vaca (litro por vaca) simulado para un periodo de rotación de pradera de la especie kikuyo de 45 a 60 días, para un periodo de lactancia de 300 días iniciado en Enero.



La producción total mensual de leche por vaca estimada fue de 3870 Litros durante todo el periodo de lactancia, mientras la producción potencial total mensual de leche por vaca fue de 4242,3 Litros, lo que indicó una diferencia notable en su valor. En términos generales la producción potencial será siempre mayor a la estimada, ya que la potencial asume una plena alimentación del animal.

**Tabla 4-10:** producción de leche para un periodo de lactancia de 300 días, iniciando en el mes de enero (Periodo Seco).

<b>Periodo de lactancia de 300 días Iniciado en Enero</b>				
Mes	Promedio diario de producción de leche por vaca a escala mensual <b>POTENCIAL</b> (l/vaca/día)	Producción mensual de leche por vaca <b>POTENCIAL</b> (l/vaca/mes)	Promedio diario de producción de leche por vaca a escala mensual <b>ESTIMADA</b> (l/vaca/día)	Producción mensual de leche por vaca <b>ESTIMADA</b> (l/vaca/mes)
Enero	9,8	295,2	9,3	279,1
Febrero	17,7	531,6	15,5	465,3
Marzo	17,7	531,3	16,0	479,1
Abril	16,7	500,5	14,8	444,7
Mayo	15,3	460,0	14,3	429,1
Junio	13,9	417,1	12,0	360,2
Julio	12,5	375,0	10,9	328,0
Agosto	11,2	335,1	10,2	306,6
Septiembre	9,9	298,2	9,6	286,8
Octubre	8,8	264,4	8,7	259,6
Noviembre	7,8	233,9	7,7	231,3
	<b>TOTAL</b>	4242,3	<b>TOTAL</b>	3870,0

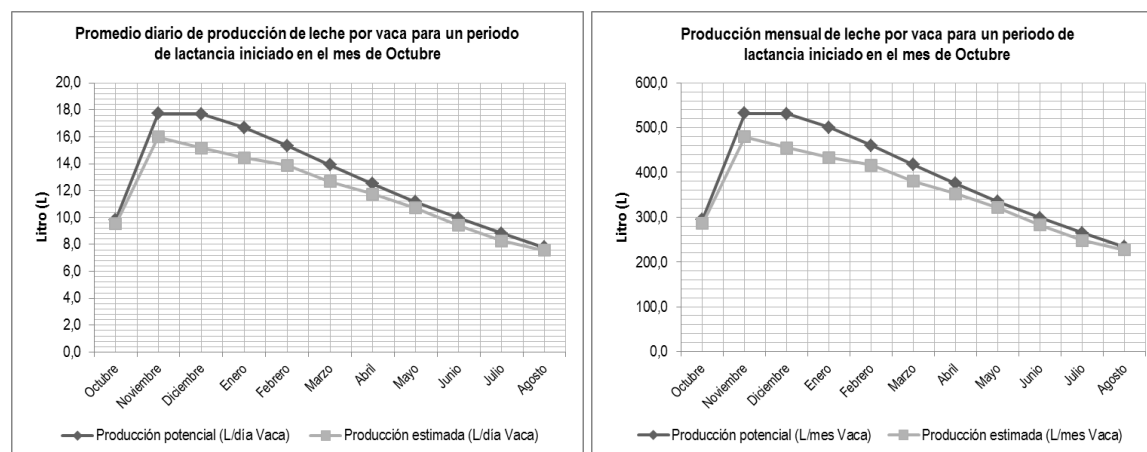
La segunda corrida del modelo (Figura 4-39) tuvo como punto de inicio el mes de octubre perteneciente al último trimestre del año o segundo trimestre de lluvias (septiembre, octubre y noviembre). El primer mes del periodo de lactancia tuvo un valor de promedio diario de producción de leche por vaca de 9.5 l/vaca/día, teniendo un comportamiento similar al periodo de lactancia iniciado en el mes de enero.

La producción máxima se dio en el segundo mes de lactancia (noviembre), a diferencia del periodo lactancia iniciado en el mes de enero, con un valor promedio mensual de 16 Litros/día vaca, explicado principalmente por el periodo de lluvias, que incrementa la disponibilidad de alimento traducido en rendimiento de leche.

En el periodo de persistencia, la producción decae aproximadamente a una tasa de 1 Litro por vaca, terminando la etapa de lactancia con un valor de Litros/día vaca, siendo muy similar al estimado en la primera corrida del modelo.

La producción total mensual de leche por vaca estimada es de 3881 Litros durante todo el periodo de lactancia, mientras la producción potencial total mensual de leche por vaca potencial es de 4242,3 Litros, indicando una diferencia notable en su valor (Tabla 4-11)

**Figura 4-39:** producción promedio mensual y agregada mensual de leche por vaca (litro por vaca) simulado para un periodo de rotación de pradera de la especie kikuyo de 45 a 60 días, para un periodo de lactancia de 300 días iniciado en Octubre.



**Tabla 4-11:** producción de leche para un periodo de lactancia de 300 días, iniciando en el mes de octubre (temporada húmeda).

Periodo de lactancia de 300 días Iniciado en Octubre				
Mes	Promedio diario de producción de leche por vaca a escala mensual <b>POTENCIAL</b> (l/vaca/día)	Producción mensual de leche por vaca <b>POTENCIAL</b> (l/vaca/mes)	Promedio diario de producción de leche por vaca a escala mensual <b>ESTIMADA</b> (l/vaca/mes)	Producción mensual de leche por vaca <b>ESTIMADA</b> (l/vaca/mes)
Octubre	9,8	295,2	9,5	286,0
Noviembre	17,7	531,6	16,0	479,4
Diciembre	17,7	531,3	15,2	455,5
Enero	16,7	500,5	14,4	433,3
Febrero	15,3	460,0	13,9	416,2
Marzo	13,9	417,1	12,7	380,3
Abril	12,5	375,0	11,7	352,1
Mayo	11,2	335,1	10,7	321,3
Junio	9,9	298,2	9,4	282,2
Julio	8,8	264,4	8,3	248,3
Agosto	7,8	233,9	7,5	226,5
<b>TOTAL</b>		<b>4242,3</b>	<b>TOTAL</b>	<b>3881,1</b>

Dado que la temporada climática fue diferente para la realización de las dos corridas (sequía y lluvia) éste factor no pareció afectar de manera directa la producción de leche, ya que los valores de producción total en ambos periodos de lactancia no tuvieron una diferencia mayor a 12 litros, por lo que el periodo de lactancia iniciado en el mes de enero mostró con un valor de 3870 Litros y el iniciado en el mes de octubre con 3881.1 Litros pueden ser considerados como producciones similares.



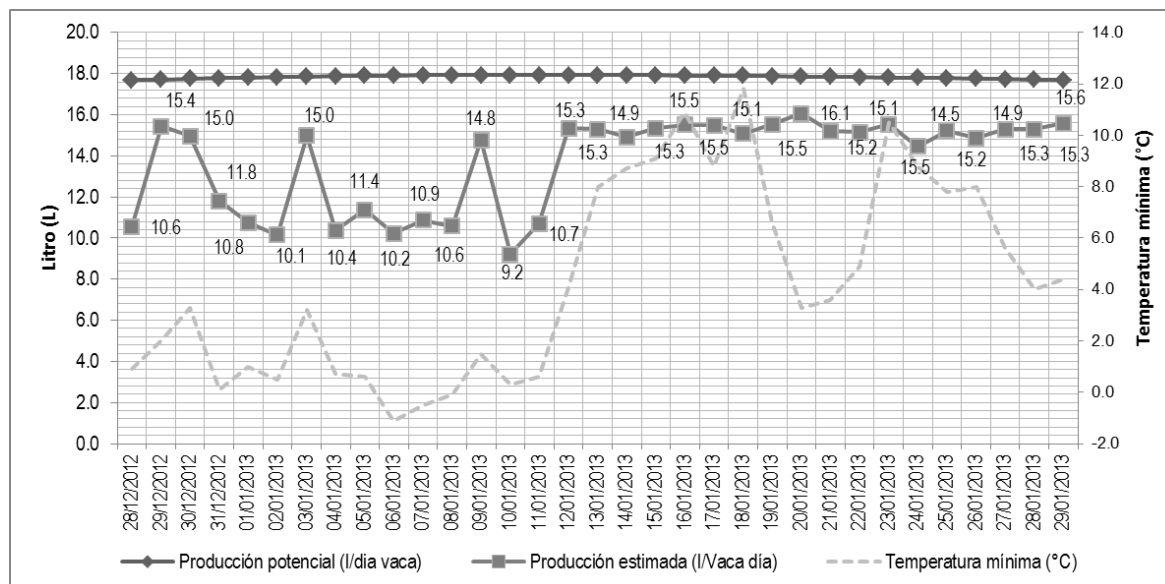
### 4.5.3 Modelación de producción lechera ante la ocurrencia de heladas (Análisis de sensibilidad)

Es claro que ante la ocurrencia de una helada, la producción de leche puede caer considerablemente, tal como lo reportó Analac (2012), que de acuerdo a heladas y sequías presentadas a inicios de 2010, periodo influenciado por la presencia de un evento El Niño, la producción nacional en el mes de enero disminuyó en casi 50 millones de litros, pasando de 410,99 millones de litros en el año 2009 a 363 millones de litros en el año 2010 para todo el territorio nacional, así sucesivamente para los meses pertenecientes a la primera temporada seca del año. Según Marquinez (2001) tan sólo en el 2001 la presentación de temperaturas muy bajas en el altiplano Cundiboyacense afectó aproximadamente unas 500.000 toneladas de forraje, representando una contracción de la producción lechera en casi un 41%.

Es notorio que el Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) al ser un forraje de trópico alto, de excelente tasa de crecimiento, densa producción de forraje, de fácil propagación y valor nutritivo para el ganado lechero, adaptado a alturas comprendidas entre 2100 y 3000 msnm y temperatura media entre 9°C y 15°C, presenta problemas para tolerar y aclimatarse a bajas temperaturas (menores a 0°C), debido principalmente a su origen africano (África Central y Oriental), no como otros forrajes como el ryegrass (*Lolium perenne*) de origen nórdico, pero también a sus condiciones de fotosíntesis considerada como C4, cuyas característica principal es que su pared celular es más grande que una planta con capacidad fotosintética C3, ocasionando que en la exposición a bajas temperaturas se presente un endurecimiento que favorece el rompimiento celular (Marquinez Casas, 2001)..

Por otro lado la actividad fisiológica se interrumpe, de acuerdo a la intensidad y duración de la helada, ya que la planta presenta un estrés en la condición morfológica y fisiológica de los tejidos y órganos, tales como la membrana celular la cual cambia a un estado semicristalino con valores cercanos a los 0°C. Las disfunciones fisiológicas presentadas por la planta se condensan en: disminución de la velocidad en que se desarrollan las reacciones químicas, cambios conformacionales del forraje que afectan inevitablemente su estructura y alteración o desequilibrio osmótico generando la deshidratación celular (Marquinez Casas, 2001).

**Figura 4-40:** resultados de la modelación de la producción diaria de leche para el mes de enero de 2013.



Mencionadas las alteraciones que sufre el forraje a condiciones de bajas temperaturas, es inevitable que los valores de EM, concentración de P y Ca disminuyan, afectando la capacidad nutricional del forraje. La cuantificación de la pérdida de la capacidad nutritiva del forraje puede ser mayor al 20% del total (Arce, 2013), dato utilizado para realizar la simulación, por lo que el bovino en el momento de consumir el alimento puede que presente deficiencias nutricionales que se vean reflejados en la producción de leche.

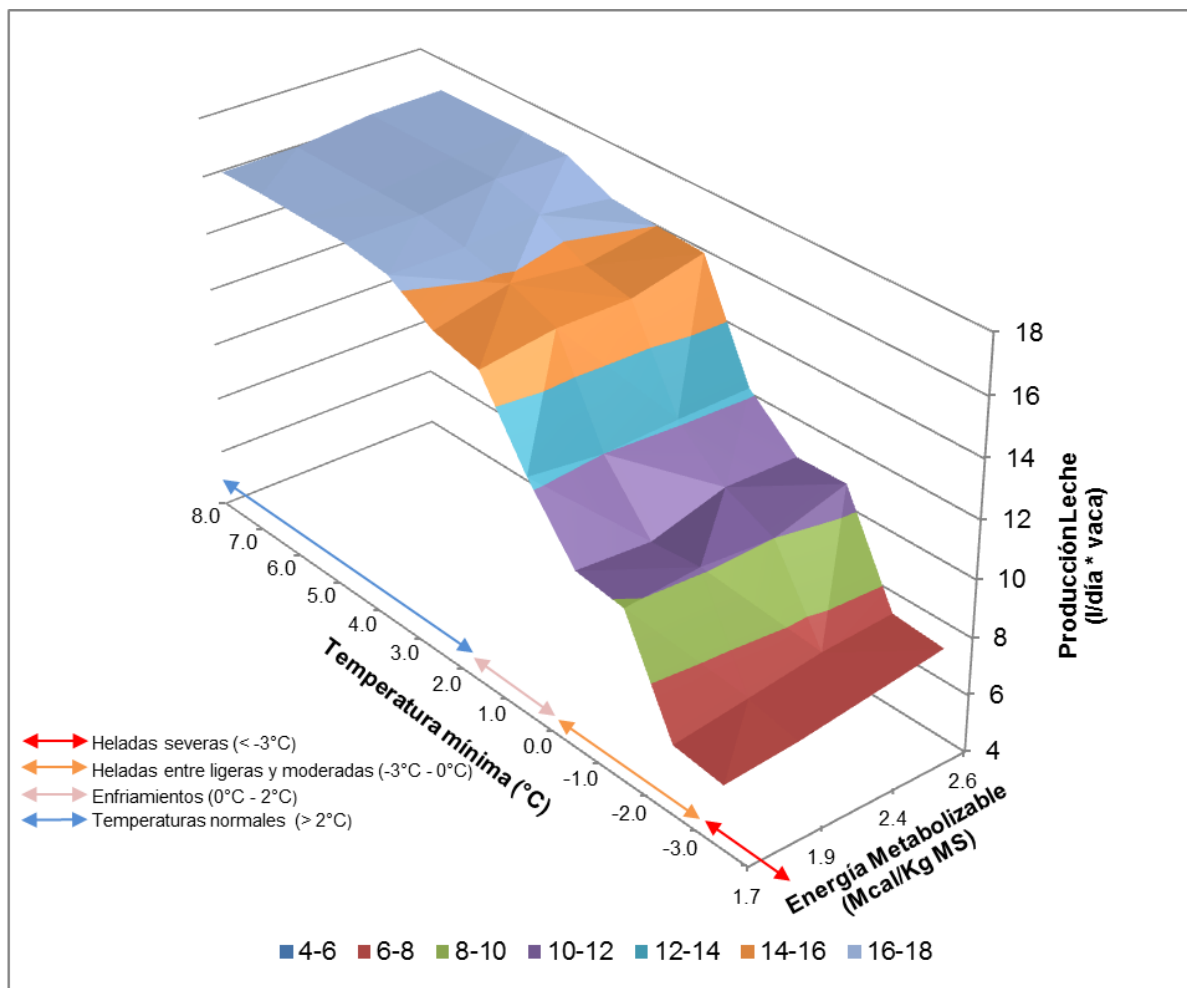
Esta afirmación puede ser observada a través de los resultados mostrados en la Figura 4-40 cuya modelación a escala diaria para el mes de enero de 2013, con un periodo de lactancia que va desde el día 30 hasta el día 60, una producción potencial diaria de leche variable entre 17,5 y 17,9 l/vaca/día. En dicho periodo se presentaron ocho eventos considerados como enfriamientos (entre 0°C y 2°C) y cuatro heladas entre ligeras y moderadas (no menores de -3°C), cuyo resultado en la modelación mostró una disminución en la producción diaria de leche de aproximadamente 5 l/vaca/día, de manera que la disponibilidad del forraje (Kg\*MS) es afectada considerablemente.

De la misma forma y con el objetivo de visualizar los escenarios más probables, se construyó una superficie respuesta de tres variables a partir del uso del modelo simulación del sistema de producción lechero de Aguilar *et al* (2004), en el que se

mantiene fija una variable (temperatura mínima), sobre el efecto de dos variables (disponibilidad del forraje y producción de leche).

Los resultados mostrados en la Figura 4-41, revelaron una alta influencia de la temperatura mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ) en la disponibilidad de forraje y en la producción de leche, así que: las temperaturas mínimas por debajo de los  $-3^{\circ}\text{C}$  (heladas severas) mostraron una producción de leche entre 6 y 8 l/vaca/día, mientras para heladas entre ligeras y moderadas ( $-3^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}$ ), la producción se sitúa entre 6 y 10 l/vaca/día, dependiendo de la concentración energética del forraje, la cual varió entre 1.9 y 2.4 Mcal/Kg\*MS.

**Figura 4-41:** superficies de respuesta obtenidas a partir del uso del modelo Aguilar *et al* (2004) combinando las variables: temperatura mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ) y energía metabolizable (Mcal/Kg\*MS) (disponibilidad de forraje), para obtener



De la misma forma, la producción de leche durante un enfriamiento ( $0^{\circ}\text{C}$  -  $2^{\circ}\text{C}$ ) se sitúa entre 10 y 16 l/vaca/día, lo que muestra que por encima del nivel de umbral de daño del pasto ( $0^{\circ}\text{C}$ , para el pasto kikuyo), la producción de leche tiende a comportarse de manera normal. Por lo tanto, por encima de  $2^{\circ}\text{C}$ , la producción de leche se establece entre 15 y 16 l/vaca/día, indicando valores cercanos a los del sistema de producción del área de estudio; esto implica que cercano al umbral de daño, cuando se producen los enfriamientos ( $0^{\circ}\text{C}$  –  $2^{\circ}\text{C}$ ), el productor tendría la opción de aplicar medidas oportunas en el manejo del pasto kikuyo y por consecuencia en la nutrición animal, asegurando el promedio de producción de leche.

## **4.6 Medidas de control y manejo en el sistema de producción lechera ante la ocurrencia de heladas.**

Como se aprecia en la sección 4.5.3 los pastos kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), presentan alta sensibilidad a las bajas temperaturas, ocasionando que los valores nutricionales disminuyan, causando que la producción de leche se reduzca ya que el pasto no puede satisfacer los requerimientos nutricionales y de energía que necesita el bovino para mantener su plena producción.

Por ello los métodos de control de heladas, destinados a minimizar los efectos de las bajas temperaturas en los forrajes, y las medidas de manejo, que buscan intervenir directamente sobre el medio de producción (vaca), toman un rol preponderante ya que aplicarlos de manera adecuada, ayudan a minimizar la disminución de los rendimientos, reflejándose directamente en el ámbito económico.

### **4.6.1 Control y previsión de la helada**

El control y previsión de heladas se tornan parte fundamental para contrarrestar los efectos negativos producidos por la rápida disminución de la temperatura, por ello ante el sondeo realizado en las fincas escogidas en la investigación se determinó lo siguiente:

- Pregunta 1

***¿Cuál es método que más utilizan para mitigar los impactos producidos por las heladas en los pastos?***

Cinco de ocho ganaderos, no utilizan ningún tipo de método para el control y previsión de las heladas; dos ganaderos de ocho, utilizan el riego o aspersión sobre el pasto (método activo), mientras sólo un ganadero utiliza cercas vivas y barreras de árboles.

Se concluye que a pesar de existir gran variedad de métodos para el control y previsión de las heladas, el uso por parte de los agricultores en el valle de Ubaté y Chiquinquirá es mínimo.

**Tabla 4-12:** métodos de control y previsión de heladas utilizados por los ganaderos

Finca	Vereda	Municipio	Área de la finca (Ha)	Métodos de control y previsión de heladas utilizados	Alternativas de manejo utilizadas por los productores
San Isidro	Peña Blanca	San Miguel de Sema	1 - 5	Ninguno	Uso de forrajes secos conservados (ensilajes) y otros alimentos
El Recuerdo	Arboledas	Chiquinquirá	1 - 5	Ninguno	Ninguno
Palmitas El Moral	Peña Blanca	San Miguel de Sema	1 - 5	Riego o aspersión sobre los pastos	Uso de otras especies forrajeras
Mata redonda	Balsa arriba	Chiquinquirá	1 - 5	Ninguno	Ninguno
Chizo	Arboledas	Chiquinquirá	10 - 20	Ninguno	Uso de otras especies forrajeras
El Lago	Hato Viejo	San Miguel de Sema	20 - 50	Ninguno	Uso de otras especies forrajeras
Miramar	El Charquito	San Miguel de Sema	> 50	Cercas vivas y barreras de árboles	Uso de otras especies forrajeras - Uso de suplementos alimenticios
Potossi	Sabaneca	San Miguel de Sema	> 50	Riego o aspersión sobre el pasto	Uso de otras especies forrajeras - Uso de suplementos alimenticios

- Pregunta 2

**¿Cuál es el indicador o indicadores que les permite tempranamente predecir la ocurrencia de una helada?**, los ocho productores respondieron que la fecha (temporada seca), es el más importante indicador, no optando por otro.

#### 4.6.2 Métodos de control recomendados

Como se mencionó con anterioridad (numeral 2.4.2) los métodos de control de heladas buscan a través de herramientas anular los efectos inmediatos de éstos eventos sobre los cultivos (Snyder & de Melo-Abreu, 2010). Al respecto dos de ocho productores entrevistados resaltaron la utilización del método de control por riego, descartando

categoricamente los ventiladores, estufas y/o calderas debido al desconocimiento del método y a los costos asociados

A continuación se mencionan algunos de los métodos de control que se recomiendan para el Valle de Ubaté y Chiquinquirá, dentro de un paquete de opciones tecnológicas.

- **Riego**

El riego es uno de los métodos más usados para el control de heladas, debido a que la utilización de agua resulta ser mucho más barata que el combustible usado para las estufas y calderas. Como se mencionó con anterioridad el riego se encuentra catalogado como un método de control tanto activo (si es riego por aspersión) como pasivo (riego por superficie),

El riego por superficie busca humedecer los suelos para mejorar el almacenamiento de calor al interior de éste. Como lo describe Snyder *et al* (2010), el tipo de suelo y el contenido de agua son factores determinantes para el desencadenamiento de una helada ya que zonas con suelos secos, altamente orgánicos o zonas pantanosas recientemente drenadas presentan alta susceptibilidad a descensos fuertes de temperatura debido a los procesos físicos del suelo tales como la conducción y almacenamiento de calor, se alteran proporcionalmente de acuerdo a características del suelo tales como densidad aparente, capacidad calorífica, conductividad térmica y difusividad. Un suelo húmedo pero no saturado presenta una mejor transferencia de calor, almacenando más eficientemente la energía que evita un rápido descenso de la temperatura a nivel del suelo, por ello es recomendable humedecer el suelo uno o dos días antes de la presunción de ocurrencia del evento, principalmente en suelos secos y orgánicos que presentan baja capacidad calorífica, a una profundidad no mayor de 30 cm, ya que por debajo de dicha cota el cambio de temperatura del suelo es insignificante.

Por otro lado el riego por aspersión se utiliza para evitar la deshidratación de la hoja a causa del congelamiento producido por la helada, por lo que al aplicar una lámina de agua encima de la hoja, está ayuda a que el calor latente liberado del congelamiento evite el descenso de la temperatura en la hoja (Artunduaga, 1980).

La aplicación de una lámina de agua sobre el sistema productivo implica tener en cuenta los siguientes tópicos: tipo de aspersor utilizado (giro convencional, de tasa variable y

bajo volumen entre otros), la velocidad del viento, la temperatura mínima en área sin protección, el área superficial del pasto, la uniformidad del sistema de aspersión (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

Como se mencionó con anterioridad, aunque el riego por aspersión en superficie resulta ser más barato que la utilización de métodos basados en combustibles y electricidad, el costo de establecimiento resulta ser un limitante para el uso de ésta tecnología, así como la disponibilidad de agua en la zona (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

- **Aspectos técnicos de relevancia para utilización de riego por aspersión en pastos durante la ocurrencia de una helada**

El aspecto técnico principal para tener en cuenta a la hora realizar riego por aspersión es que durante el trabajo de defensa contra la helada, siempre haya disponibilidad de agua líquida congelándose encima de las plantas que quieren defenderse. Más o menos se considera que el calor liberado por el agua al congelarse es de más o menos 80 (cal/gr) los cuales se transmiten a las flores, hojas, yemas por conducción a través del hielo (INTA, 2005).

El tipo de riego utilizado para un pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), con una altura de no más de 20 cm en un periodo de 45 a 60 días debe ser el de aspersión convencional por encima de las plantas, ya que tiene como objetivo la protección de cultivos que no presentan un gran crecimiento. La efectividad del método depende en gran medida del caudal de riego utilizado, el cual debe ser suficiente y uniforme, ya que si se utiliza un caudal inadecuado, el agua tenderá a congelarse y causará un mayor daño a la planta ya que ésta descenderá su temperatura por debajo de las zonas a las cuales no se les aplica riego, por lo que es sumamente importante un adecuado cubrimiento de los aspersores en el área a proteger así como la frecuencia de rotación en un mismo punto (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

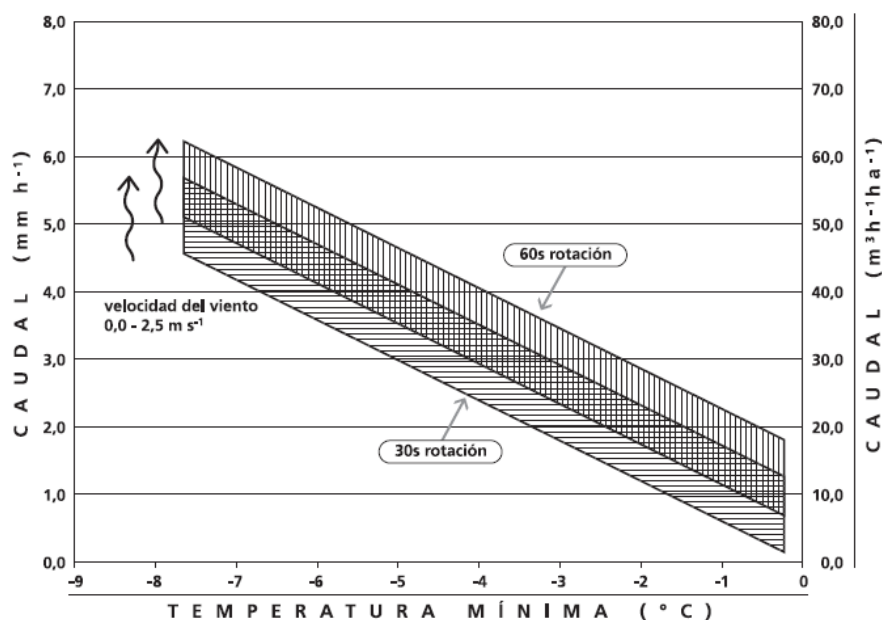
La tabla a continuación muestra los caudales de aspersión para la protección de cultivos de bajo crecimiento en función de la temperatura mínima y la tasa de giro, para velocidades del viento no mayores a  $2.5 \text{ ms}^{-1}$ , el cual es el característico de la región del Valle de Ubaté y Chiquinquirá

Es recomendable hacer una distribución uniforme de los aspersores en el área, a fin de proteger las zonas de bordes. Los cabezales deben ser colocados aproximadamente a 30 cm sobre la cubierta vegetal para evitar que las plantas bloqueen la vaporización. Finalmente los cabezales deben de estar muy bien protegidos con envolturas anti formación de hielo así como de un filtro que minimice el riesgo de bloqueo del paso del agua.

**Tabla 4-13:** caudales de aspersión recomendados para la protección de cultivos de bajo crecimiento (Snyder & de Melo-Abreu, 2010)

Temperatura mínima °C	30 s Rotación mm h <sup>-1</sup>	60 s Rotación mm h <sup>-1</sup>
-2.0	2.5	3.2
-4.0	3.8	4.5
-6.0	5.1	5.8

**Figura 4-42:** caudal de riego para aspersores convencionales sobre la cobertura vegetal para la protección contra las heladas (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).



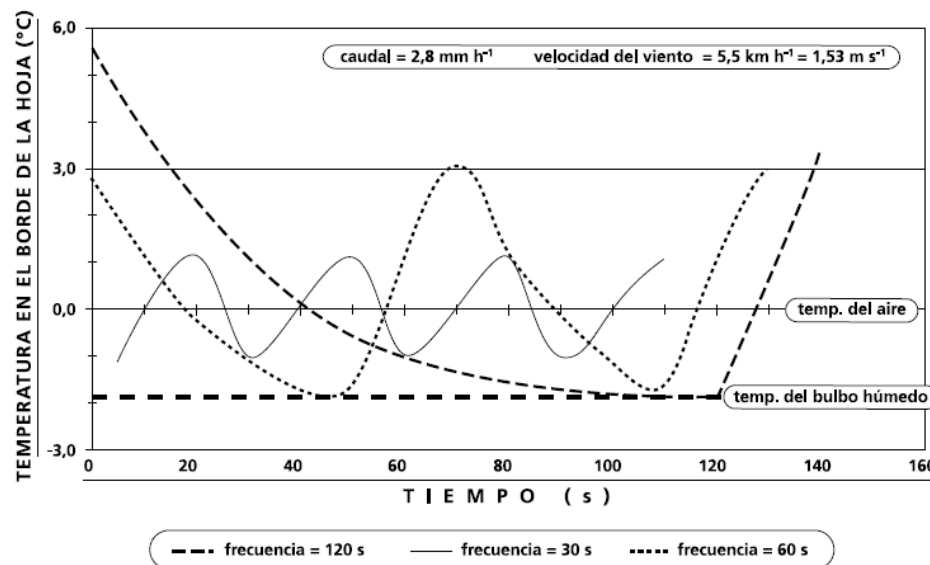
**¿Cuándo se deben poner en marcha los aspersores?** La puesta en marcha de los aspersores es quizás la tarea que mayor atención requiere, ya que si se dispone de recursos hídricos limitados habrá un desperdicio sistemático de agua. Según Snyder et



al (2010) éste procedimiento, así como el momento en donde frenar el sistema de riego, depende de la temperatura y la humedad del área considerada.

La Figura 4-43 describe adecuadamente el proceso ocurrido cuando se pone en marcha el sistema de riego; a pesar que la temperatura del aire disminuye, ésta no caera por debajo de la temperatura de las gotas de agua, subiendo de nuevo una vez empieza a congelarse y a liberar calor latente (Snyder & de Melo-Abreu, 2010). Cada vez que el agua golpea la superficie vegetal ésta empezará el proceso de congelación liberando el calor latente por cambio de fase que hara incrementar la temperatura al borde la hoja. Se debe en lo posible mantener este proceso a una frecuencia y caudal suficiente ya que un error en el cálculo de dichos parametros, tendrá un efecto adverso en la planta, causando congelamiento en el tejido interno de la hoja, que causara la deshidratación de las celulas vegetales.

**Figura 4-43:** Cambios en la temperatura del borde de la hoja cuando es humedecido por un sistema de aspersión. Tomado de Wheaton y Kidder, 1964, nombrado por (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).



Otro parámetro importante en la puesta en marcha del sistema de riego es la temperatura crítica de daño en la planta ( $T_c$ ), que para el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) es de 0°C o un poco más alta según las condiciones de la pasto (Marquinez Casas, 2001), por lo que se recomienda aplicar riego cuando la temperatura de bulbo húmedo se

encuentra ligeramente por encima de la  $T_c$  o en su defecto por encima de  $0^{\circ}\text{C}$ , umbral aconsejable para poner fin al proceso de defensa (Snyder & de Melo-Abreu, 2010).

#### 4.6.3 Alternativas de manejo de las heladas en el sistema de producción lechero

Las alternativas de manejo pueden definirse como aquellas medidas que pretenden intervenir directamente en el sistema de producción (sistema lechero), con el fin de mejorar el rendimiento y evitar pérdidas, económicas principalmente, ante una adversidad climática, fitosanitaria, nutricional entre otras más. En el caso de las heladas, consideradas como eventos extremos de origen climático, existen variadas alternativas de manejo para el sistema de producción lechero que van desde la simple rotación de potreros (acortar los periodos de rotación), hasta la aplicación de compuestos que ayuden al forraje (kikuyo) a evitar la deshidratación producida por las bajas temperaturas.

En el próximo párrafo se presentan las alternativas de manejo recomendadas por el SAAT (2012) para el sistema de producción:

- **Rotación de potreros:** se puede definir como la alternación de áreas dedicadas al pastoreo animal con el fin de evitar el agotamiento del forraje a causa de la carga del animal (alimentación del animal). En el caso del kikuyo la rotación en temporadas lluviosas suele ser entre 45 y 60 días, mientras para las temporadas secas, periodo de mayor susceptibilidad a las heladas, se debe acortar la rotación ya que al ser inferior el contenido nutricional del pasto, la respuesta del animal en relación a la producción es menor.
- **Uso de suplementos alimenticios como bloques nutricionales y follajes:** ante la disminución o pérdida del contenido nutricional de los forrajes, los bloques nutricionales, aportantes de gran cantidad de carbohidratos, minerales, grasas, etc., evitan la pérdida de la productividad del animal, reemplazando lo faltante del pasto.
- **Uso de forrajes secos conservados (ensilajes) y otros alimentos:** se basa en la preservación de los forrajes verdes, los cuales a través de un proceso de fermentación anaerobia conserva el valor nutritivo.
- **Uso de otras especies de forrajes:** utilizar otras especies de forrajes resistentes a las bajas temperaturas de manera extensiva o intercalada (como ryegrass, alfalfa,

trébol entre otras) contribuye a aumentar la calidad del forraje, ya que recupera la pastura en menor tiempo así como reduce el impacto de las heladas.

- **Aplicación de productos de origen orgánico o residuos:** la aplicación de productos orgánicos como putrescina (derivado de fragmentos en descomposición), retrasa el proceso de deshidratación, logrando disminuir la muerte celular en la hoja (Marquinez Casas, 2001).

En la entrevista a los productores del valle de Ubaté y Chiquinquirá se les indagó sobre qué métodos de manejo utilizan ante las heladas, el resultado mostró lo siguiente: dos de ocho productores no utilizan ningún tipo de alternativa de manejo ante la ocurrencia de heladas, debido al tamaño del hato y al rendimiento obtenido por animal.

**Tabla 4-14:** métodos de control y previsión de heladas utilizados por los ganaderos

Finca	Vereda	Municipio	Área de la finca (Ha)	Alternativas de manejo utilizadas por los productores
San Isidro	Peña Blanca	San Miguel de Sema	1 - 5	Uso de forrajes secos conservados (ensilajes) y otros alimentos
El Recuerdo	Arboledas	Chiquinquirá	1 - 5	Ninguno
Palmitas El Moral	Peña Blanca	San Miguel de Sema	1 - 5	Uso de otras especies forrajeras
Mata redonda	Balsa arriba	Chiquinquirá	1 – 5	Ninguno
Chizo	Arboledas	Chiquinquirá	10 - 20	Uso de otras especies forrajeras
El Lago	Hato Viejo	San Miguel de Sema	20 - 50	Uso de otras especies forrajeras
Miramar	El Charquito	San Miguel de Sema	> 50	Uso de otras especies forrajeras - Uso de suplementos alimenticios
Potosi	Sabaneca	San Miguel de Sema	> 50	Uso de otras especies forrajeras - Uso de suplementos alimenticios

Sin embargo las fincas restantes utilizan una o varias alternativas de manejo como: el uso de forrajes secos, uso de otras especies forrajeras y uso de suplementos alimenticios, ésta última alternativa utilizada por los hatos con mayor rendimiento por vaca.



## 5. Conclusiones y recomendaciones

El trabajo realizado constituye un esfuerzo integral en el análisis de riesgo agroclimático, ya que se enfoca en caracterizar de manera cuidadosa las heladas de radiación, típicas del altiplano Cundiboyacense, así como establecer la metodología para la identificación de zonas cuya susceptibilidad territorial a dichos eventos favorecen o inhiben los efectos adversos derivados de las bajas temperaturas nocturnas.

La caracterización climática de la zona a través de temporadas agroclimáticas, permitió identificar el comportamiento de las variables climáticas a una escala intra e inter-anual, permitiendo corroborar la asociación entre los eventos ENSO, el comportamiento de las variables climáticas y su relación con los periodos de heladas.

A nivel climático se encontró una escasa asociación lineal entre la serie temporal del ONI y las series de las variables climáticas analizadas a nivel sincrónico, destacando una asociación inversa con la precipitación y la humedad relativa, asociación directa con la temperatura media y máxima y poca o ninguna asociación sobre la temperatura mínima y el brillo solar, sin embargo no se descarta que la fluctuación de la temperatura superficial del mar induzca una señal de variabilidad climática más fuerte que altere significativamente el comportamiento climático de la región.

Se estableció de manera clara y consistente a través del análisis de contingencia (análisis compuesto), la afectación significativa de la precipitación, temperatura máxima, temperatura media y humedad relativa bajo la influencia de eventos ENSO, sobre todo en los periodos secos o de escasas precipitaciones (DEF y JJA), estableciendo la relación: cuando persisten las condiciones cálidas en la superficie del mar tropical del pacifico ecuatorial, en la región Niño 3.4 (episodio El Niño), la precipitación tiende a comportarse por debajo de lo normal mientras la temperatura media y máxima tiende a comportarse

por encima de lo normal; cuando existen condiciones frías en dicha área (episodio La Niña) la precipitación tiende a comportarse por encima de lo normal, mientras la temperatura media y máxima tienden a comportarse por debajo de lo normal.

A nivel biofísico se definió una metodología para el análisis de susceptibilidad territorial a las heladas, siendo un aporte original y de fácil aplicación, para ser incluido como base de procesos de ordenación territorial y manejo integrado de cultivos. Como resultado de la aplicación de la metodología en el valle de Ubaté y Chiquinquirá, se observó que el grado de exposición a heladas en la región tiene una clasificación moderada, por lo que algunas variables tales como: textura de los suelos, cobertura y cercanía a los cuerpos de agua, en gran parte de la región, favorecen las condiciones para el desarrollo y ocurrencia de dichos eventos extremos. Por otro lado variables tales como: paisaje, elevación y pendiente, tienen características que inhiben las condiciones para el desarrollo del evento.

La aplicación de una metodología para la caracterización de las heladas en la subregión del Valle de Ubaté y Chiquinquirá, permitió determinar con precisión el comportamiento típico de los eventos extremos a nivel espacial y temporal, estableciendo una relación entre la categoría del nivel de severidad de la helada con los posibles daños ocasionados en cultivos y pastos, específicamente en el pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), pastura predominante en la región. Como resultado se estableció la siguiente categorización: **< -3°C** heladas severas, entre **-3°C y 0°C** heladas entre ligeras y moderadas (umbral de daño para el pasto kikuyo) y entre **0°C y 2°C** enfriamientos.

La relación entre la caracterización climática y de las heladas, permitió conocer los periodos agroclimáticos donde existe mayor probabilidad que se presenten alguna de las tres categorías de heladas establecidas. En el caso de los enfriamientos se estableció con gran certeza que los trimestres DEF y JJA (temporadas secas) tienen mayor probabilidad de ocurrencia, al igual que en las heladas de tipo entre ligeras y moderadas; Las heladas severas presentan mayor probabilidad de ocurrencia en el trimestre DEF

Se determinó a través de fuentes secundarias de información que el tipo de helada que se presenta en el país es la “Helada de radiación”, debido a la ubicación tropical del país,

donde es inexistente la invasión de masas de aire frías procedentes de las regiones polares.

Los periodos de retorno mostraron como en diferentes lugares de la zona de estudio pueden presentarse varios niveles de intensidad (según la escala de severidad del tipo de helada: enfriamiento, heladas entre ligeras y moderadas y heladas severas), por lo que se concluye que: el valle del Chicamocha y en menor proporción la sabana de Bogotá, muestran un mayor grado de amenaza que el valle de Ubaté y Chiquinquirá, ya que en periodos de retorno de tan sólo dos años, el valle del Chicamocha puede presentar valores por debajo de  $-3^{\circ}\text{C}$ , mientras que el valle de Ubaté y Chiquinquirá no sobrepasa la categoría de enfriamientos ( $0^{\circ}\text{C}$  a  $2^{\circ}\text{C}$ ). Para las pastos tipo kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), pastura predominante en la zona, supone una mayor amenaza establecer praderas en inmediaciones del Valle del Chicamocha y Sabana de Bogotá que en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá.

Es importante resaltar una clara asociación entre la frecuencia de los episodios de heladas y los eventos ENSO, como base fundamental para una adecuada predicción estacional, ya que ante la presencia de un fenómeno El Niño en el primer trimestre seco del año (DEF), se incrementa la probabilidad (40% - 80%) que aumenten por encima de lo normal la recurrencia de dichos eventos, determinando que existe un mayor grado de amenaza y por tanto, recomendando a gremios de la producción (especialmente asociaciones y cooperativas lecheras), campesinos y asistentes técnicos municipales y departamentales, establecer acciones de manejo y control a los efectos ocasionados por las bajas temperaturas; por el contrario ante la ocurrencia de un fenómeno de La Niña en el trimestre DEF, se incrementa sustancialmente la probabilidad que decrezca el número de heladas, corroborando dicha asociación. Para los otros trimestres del año la asociación no es significativa, por lo que se descarta la influencia de los ENSO.

La aplicación del modelo FFST, recomendado por la FAO, para el pronóstico local de las heladas de radiación, permitió establecer en primer lugar, una metodología de carácter empírica que puede ser fácilmente adaptada para uso local por parte de productores lecheros en el valle de Ubaté y Chiquinquirá.

No se debe descartar la utilización de modelos dinámicos (modelos de circulación general de la atmosfera y de mesoescala para tiempo y clima), debido que la formulación

física utilizada traza la tendencia de los registros climáticos, pautas generales para establecer con precisión

A pesar que los resultados de la predicción no fueran del todo satisfactorios, en términos de evaluación del pronóstico, debe precisarse que datos derivados de la modelación deben ser asumidos de forma preliminar, básicamente debido a la poca cantidad de información disponible (no más de tres meses) para la calibración, por lo que se propone a gremios, centros de investigación y unidades de asistencia técnica local, mejorar de manera sustancial el monitoreo de variables climáticas (instalación de estaciones meteorológicas de monitoreo local) para que metodologías aplicadas a escala local, puedan ser fácilmente utilizadas como complemento a los pronósticos nacionales realizados por el IDEAM.

Los resultados de las entrevistas merecen un análisis cuidadoso ya que involucran desde el pequeño ganadero hasta el gran productor, suponiendo una muestra válida de las características generales del sistema de producción lechero y de las medidas adoptadas por cada uno ante la ocurrencia de heladas.

Se estableció a través de la caracterización del sistema de producción lechero, que los pequeños hatos (áreas menores a 10 ha, con un máximo de 20 animales), se componen de cruces (razas mezcladas), con producciones de no más de 10 l/vaca/día, mientras los hatos medianos (áreas entre 10 y 50 ha, con un máximo de 100 animales), están compuestos de razas especializadas en la producción de leche como lo es la Holstein, con producciones que varían entre 5 y 20 l/vaca/día. Los hatos grandes, de áreas mayores a 50 ha, compuestos por más de 50 animales

La aplicación del modelo de Wood en el ajuste de la curva de lactancia para la zona del valle de Ubaté y Chiquinquirá, permitió ajustar de manera adecuada y significativa el modelo de producción de leche, así como la caracterización del rendimiento o producción potencial de la zona de estudio.

Las modelaciones realizadas a los rendimientos estimados de leche, no mostró una diferencia notable entre los periodos de lactancia simulados para temporada seca y para temporada de lluvias. Si bien es cierto que el valor máximo en el rendimiento de leche



para la temporada seca se produjo en el tercer mes del periodo de lactancia y en la húmeda, en el segundo mes de lactancia, ésta diferencia puede atribuirse a que el modelo relacionó más el comportamiento a la disponibilidad de alimento derivada de las condiciones climáticas, que al mismo contenido nutricional del forraje.

Los resultados de la simulación para enero de 2013 mostraron una alta sensibilidad del kikuyo (*pennisetum clandestinum*) a las heladas, ya que las pérdidas nutricionales de los pastos causadas por el evento, ocasiona una apreciable disminución en los rendimientos por bovino, aproximadamente un 20%, los cuales sólo pueden manejarse a través de la aplicación de alternativas de manejo.

El nivel tecnológico en el control y previsión de bajas temperaturas por parte de los productores de la zona, refleja una módica capacidad adaptativa en temporadas de mayor intensidad, sobre todo en temporadas secas, haciendo más vulnerable el sistema productivo a eventos climáticos extremos como lo son las heladas.

Los indicadores utilizados por los productores para el seguimiento de los periodos de heladas son apropiados ya que se basan en la variabilidad climática estacional de la zona, pero son mínimos ante otras escalas temporales de variabilidad.

A nivel de alternativas de manejo de heladas, los productores de la zona presentan una mayor apropiación y conocimiento de los métodos, debido que éstas intervienen de manera directa en el sistema productivo, reflejando una mejora en el rendimiento por animal.

A nivel investigativo, es necesario profundizar en los análisis climáticos y biofísicos de las zonas susceptibles a heladas, ya sea aplicando ésta u otra metodología indiferente, ya que se podrá determinar con certeza que variables son determinantes en la incidencia y severidad de las heladas.

De la misma forma, se deben priorizar líneas de investigación que determinen los efectos de los eventos climáticos extremos (heladas, sequías, excesos de lluvias, entre otros), en la calidad y disponibilidad de los forrajes, siendo las variables más sensibles para el manejo de pastos y alimentación animal. A través de experimentos en campo y

laboratorio, se obtendrán coeficientes técnicos con el objetivo de realizar análisis agroclimáticos que podrían ser utilizados en modelaciones y simulaciones del sistema de producción, para ser usados por los productores, implementando medidas oportunas en el manejo de los pastos en función de los eventos climáticos extremos.

# Bibliografía

- Agrocadenas. (2005). *Documento de trabajo N° 98. La cadena de lácteos en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica 1991 - 2005*. Bogotá: Ministerio de agricultura y desarrollo rural - Observatorio agrocadenas Colombia.
- Aguilar González, C., Allende Vargas, R., & Morales Juregui, S. (2004). *Gestión de sistemas pecuarios*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Allen, C. (1957). A simplified equation for minimum temperature prediction. *Monthly Weather Review* V.85 - 4, 119-120.
- Alvarez García, J. E. (2001). *Proceso de investigación para un anteproyecto*. Bogotá: Edijufinancieras.
- ANALAC. (2012). *Balance de la leche en Colombia año 2011*. Bogotá: Analac.
- Arce, B. (15 de 05 de 2013). Pérdida de contenido nutricional en una pastura ante la ocurrencia de heladas. (D. A. Gómez, Entrevistador)
- Artunduaga, R. (1980). *Las heladas y su control*. Bogotá D.C.: Temas de Orientación Agropecuaria TOA.
- Bivand, R., Pebesma, E., & Gómez-Rubio, V. (2008). *Applied spatial data analysis with R*. New York: Springer.
- Boshell, J. F. (1998). *Los riesgos hidrológicos del agro colombiano. Región altiplano central y nororiente*. Bogotá: Caja de crédito agrario.
- Boshell, J. F. (2008). Elementos de análisis para el manejo de las amenazas del cambio climático en la agricultura colombiana. *Innovación y Cambio Tecnológico* Vol. 7 N° 7, 38-50.
- Cadena, M. C. (2006). *Estudio de diversos índices de sequía para la región Caribe Colombiana, Tesis para optar el título de Magister en Ciencias – Meteorología, Facultad de Ciencias*. Bogotá: Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia.
- CAF. (2006). *El fenómeno El Niño. Memoria, retos y soluciones VIII: Colombia*. Caracas: Corporación Andina de Fomento-CAF. Recuperado el 18 de Enero de 2013, de <http://publicaciones.caf.com/media/1285/109.pdf>

- Caracol Radio. (5 de Febrero de 2007). *Heladas dejan millonarias pérdidas al sector agropecuario*. Obtenido de Caracol Radio: <http://www.caracol.com.co/noticias/actualidad/heladas-dejan-millonarias-perdidas-al-sector-agropecuario/20070205/nota/387437.aspx>
- CEPAL. (2011). *La economía del cambio climático en Centroamérica*. Mexico D.F.: Comisión económica para América Latina y el Caribe-CEPAL.
- Cepeda Arias, E. R. (2010). *Recopilación histórica y análisis climatológico de eventos de granizada ocurridos sobre Bogotá y su relación con el cambio climático global*. Bogotá: Tesis de Maestría en Ingeniería - Recursos Hidraulicos. Universidad Nacional de Colombia.
- COMET Program. (2008). *Meted*. Recuperado el 14 de Enero de 2013, de [www.meted.ucar.edu](http://www.meted.ucar.edu)
- Contexto ganadero. (24 de Abril de 2014). *Contexto ganadero*. Obtenido de Cultivos de flores en la Sabana de Bogotá, en riesgo por heladas: <http://contextoganadero.com/agricultura/cultivos-de-flores-en-la-sabana-de-bogota-en-riesgo-por-heladas>
- Corpoica. (2004). *Caracterización de los sistemas de producción de leche del trópico de altura de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca. Informe Técnico Final*. Mosquera: Corporación colombiana de investigación agropecuaria.
- Corpoica. (2005). *Caracterización de los sistemas de producción de leche del tropico de altura de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca*. Mosquera: Corpoica.
- Corpoica. (2012). *Plan para el manejo de los impactos en el sector agropecuario ocasionados por la emergencia invernal*. Bogotá: Corpoica.
- Corpoica. (2012). *Zonificación del impacto de la oscilación ENOS sobre las condiciones climáticas del altiplano cundiboyacense como base para orientar la generación de transferencia de tecnología agropecuaria y reducir la vulnerabilidad climática*. Mosquera (Cundinamarca): Corporación colombiana de investigación agropecuaria-Corpoica.
- CPC-NOAA. (15 de 05 de 2013). *Cold and warm episodes by season*. Obtenido de Changes to the Oceanic Niño Index (ONI): [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)
- Dorado, J., & León, G. (2011). *Control de calidad y homogeneidad de los datos. Nota técnica del IDEAM*. Bogotá: IDEAM.
- EIRD-ONU. (2004). *Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres*. Ginebra (Suiza): Naciones Unidas.

- FAO. (1 de Abril de 2012). *Metodos sencillos para la acuicultura*. Obtenido de Textura del Suelo:  
[ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s06.htm](ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm)
- FAO Colombia. (2013). *Uso del modelo Aquacrop para estimar rendimientos para el cultivo de maíz en los departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca*. Bogotá: FAO Colombia.
- Fernandez Long, M. E., & Barnatán, I. (2011). *Heladas*. Buenos Aires: In press.
- Fernandez, J. (1995). *Las heladas su definición y control*. Bogotá.
- Geiger, R. (1965). *The climate near the ground*. Cambridge Massachusetts: Harvard University Press.
- Gutierrez Lozano , J., Vargas Tristán , V., Romero Rodríguez, M., Placido de la Cruz, J. M., Aguirre Bortoni , M., & Silva Espinoza, H. T. (2011). Periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía UNAM*, 20-33.
- Huamani, J. C. (2005). *Atlas de heladas*. Lima: SENAMHI-MINAG.
- Hurtado, G. (1986). Indices de Sequía y su aplicación operativa en Colombia. *Atmósfera* N° 5, 17.
- Hurtado, G. (1996). *Estadísticas de la helada meteorológica en Colombia*. Bogotá: Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales-IDEAM.
- Hurtado, G., & Gonzalez, O. (2011). *Evaluación de la afectación territorial de los fenómenos El Niño/La Niña y análisis de la confiabilidad de la predicción climática basada en la presencia de un evento*. Bogotá: Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales-IDEAM.
- IDEAM. (2002). *Atlas Climatológico de Colombia*. Bogotá: Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales-IDEAM.
- IDEAM. (2004). *Atlas de radiación solar de Colombia*. Bogotá: Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales-IDEAM.
- IGAC. (15 de 04 de 2013). *Sistema de información geográfica para la planeación y el ordenamiento territorial*. Obtenido de SIGOT: <http://sigotn.igac.gov.co/>
- IGAC-ORSTOM. (1984). *Estudio regional integrado del altiplano cundiboyacense*. Bogotá: IGAC.
- INTA. (1 de Septiembre de 2005). Control de heladas. Mecanismos de defensa activa y pasiva. *Fruticultura y diversificación* . Río Negro, Argentina: Publicación del INTA.

- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment*. Ginebra: Cambridge University Press.
- IPCC. (2012). *Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático*. Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IRI. (2012). *ENSO Info*. Recuperado el 15 de Enero de 2013, de IRI Columbia: <http://portal.iri.columbia.edu/>
- Kalma, J. D., Laughlin, G. P., Caprio, J. M., & Hamer, P. C. (1992). Advances in Bioclimatology 2. *The Bioclimatology of Frost*. Berlin: Springer-Verlag, 144.
- Kalma, J., Laughlin, G., Kaprio, J., & Hamer, P. (1992). *Advances in bioclimatology 2. The Bioclimatology of Frost*. Berlin: Springer-Verlag.
- Lamas, J., Castro, S., Gil, N., Castro, J. M., Elmazouzi, L., Alvarez, J., . . . Sanchez, L. (2013). Aplicación del sistema de monitorización ambiental INNOAMB para manejo integral de una plantación de kiwis. *VII Congreso ibérico de agroingeniería y ciencias hortícolas*, (pág. 6). Madrid.
- Laredo, M. A. (1986). Minerales y producción de leche en zonas frías de Colombia. *Seminario nacional de ganado de leche. Producción de ganado lechero en zonas frías* (págs. 185-203). Bogotá: ICA.
- Laredo, M. A., & Cuesta Peralta, A. (1988). *Tabla de contenido nutricional de pastos y forrajes de Colombia*. Bogotá: ICA.
- Laredo, M. A., & Mendoza, P. (1982). Valor nutritivo de pastos en zonas frías. I Pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst). Anual y estacional. *Revista ICA Vol. 17 N° 4*, 157-167.
- Laredo, M. A., & Mendoza, P. (1983). Fluctuaciones minerales en pastos de clima frío colombiano. II Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*, Hocsth). Anual y estacional. *Revista ICA Vol. 18 N° 4*, 269-278.
- León Aristizabal, G. (2005). *Verificación de los modelo meteorológicos*. Bogotá: IDEAM-Meteo/0001-05.
- Leon Aristizabal, G., & Ruiz Murcia, F. (2004). TMIN. Bogotá, D.C., Colombia.
- León-Laverde, C. U., Arce, B., & Quiroz, R. (1997). Modelación de sistemas de producción de leche: descripción de sus componentes e interacciones para el diseño de modelos de simulación. En C. E. Lascano, & F. Holmann, *Conceptos y metodologías de investigación en fincas con sistemas de producción animal de doble propósito* (págs. 95-116). Calí (Colombia): CIAT - Consorcio Tropiclleche.

- Madden, R. (2009). *Commet Programm*. Recuperado el 15 de Enero de 2013, de El ciclo de vida de la oscilación Madden-Julian: [http://www.meted.ucar.edu/climate/mjo\\_es/](http://www.meted.ucar.edu/climate/mjo_es/)
- MADR. (24 de Abril de 2014). *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural*. Obtenido de Recomendaciones técnicas para disminuir el efecto de las heladas: <https://www.minagricultura.gov.co/>
- Marquinez Casas, X. (2001). *Determinación de posibles mecanismos fisiológicos de tolerancia a heladas en los pastos kikuyo y falsa poa*. Bogotá: Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias - Fisiología. Universidad Nacional de Colombia.
- Mavi, H., & Tupper, G. (2004). *Agrometeorology: principles and applications of climate studies in agriculture*. New York: Food Product Press.
- Mayorga, R., González, Y., & Hurtado, G. (2008). *Las heladas en Colombia. Documento técnico de respaldo a la información en la página web del IDEAM*. Bogotá: Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales-IDEAM.
- METED. (15 de Septiembre de 2013). *METED*. Obtenido de Teoría del hidrograma unitario: [http://www.meted.ucar.edu/hydro/basic\\_int/unit\\_hydrograph\\_es/index.htm](http://www.meted.ucar.edu/hydro/basic_int/unit_hydrograph_es/index.htm)
- Montealegre, J. E. (1990). *Técnicas estadísticas aplicadas en el manejo de datos hidrológicos y meteorológicos*. Bogotá: HIMAT.
- Montealegre, J. E. (1999). *La influencia de los procesos de interacción océano-atmósfera del Pacífico tropical y el Atlántico en la variabilidad interanual de la precipitación en Colombia*. Bogotá: Tesis de M.Sc. en Meteorología. Universidad Nacional de Colombia.
- Montealegre, J. E. (2007). *Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia*. Bogotá: Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales-IDEAM.
- Montealegre, J. E. (2009). *Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceanicos y atmosféricos de meso y gran escala*. Bogotá: Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales - IDEAM.
- Montealegre, J. E. (2012). *Determinación de las alteraciones de la precipitación y la temperatura del aire durante los fenómenos El Niño y La Niña con base en datos históricos de las estaciones meteorológicas en la región capital (Bogotá y Cundinamarca)*. Bogotá: Plan regional integral de cambio climático región capital - PRICC.
- Naumann , G., Walter , M., Vargas, H., & Minetti, L. (2007). Análisis de variabilidad intraestacional de la temperatura en Sudamérica y su relación con la oscilación

- Madden-Julian. *XVI Congreso Mexicano de Meteorología*. Veracruz: Organización Mexicana de Meteorólogos-OMMAC.
- NOAA. (2003). *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Recuperado el 16 de Enero de 2013, de Monthly atmospheric and SST indices: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>
- NOAA. (1 de 06 de 2011). *UCAR Program Scientist*. Obtenido de Creating a Local Climate Product Using CompositeAnalysis : <http://www.meted.ucar.edu/climate/composite/index.htm>
- Ojo, M. O. (2001). Some relationships between the generalized Gumbel and other distributions. *Kragujevac Journal of Maths* N° 23, 101-106.
- OMM. (1984). *Normales climatológicas estandar*. Ginebra (Suiza): OMM.
- Ossa S., G., Torregroza S., L., & Alvarado, L. (1997). Determinación de la curva de lactancia en vacas mestizas de un hato doble proposito en la región Caribe de Colombia. *Revista Corpoica Vol2 N°1*, 54-57.
- Pabón , J. D. (2011). *El cambio climático en el territorio de la Corporación Autonoma Regional de Cundinamarca*. Bogotá: Universidad Nacional - Corporación Autonoma Regional de Cundinamarca.
- PIUPC-UNAL. (1 de 12 de 2013). *Programa de Iniciativas Universitarias para la Paz y la Convivencia - Universidad Nacional de Colombia*. Obtenido de Entrevista: [http://www.piupc.unal.edu.co/diplomado/pdf/modulo\\_5/entrevista.pdf](http://www.piupc.unal.edu.co/diplomado/pdf/modulo_5/entrevista.pdf)
- Rodriguez, E., Camacho, L., Jimenez, W., Duarte, M., & Villarreal, J. (2008). Análisis Hidrometeorológico de granizada sobre el campus de la Universidad Nacional–Bogotá. *Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología* (pág. 1005). Bogotá: Sociedad Colombiana de Ingenieros.
- Rojas, E. O. (2011). *Evaluación del desarrollo del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática y cambio climático, en el sur oeste de la sabana de Bogotá*. Bogota: Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia.
- Sanabria, J., García, J., & Lhomme, J.-P. (2006). Calibración y validación de modelos de pronóstico de heladas en el valle del Mantaro. *ECIPERU 3 N° 1*, 18-21.
- Seguros Caja Agraria. (1998). *Los riesgos hidroclimáticos del agro colombiano. Región altiplano central y nororiente. Tomo IV*. Bogotá: Caja de crédito agrario.
- Snyder, R., & de Melo-Abreu, J. (2010). *Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO.
- Soldano, A. (2009). *Conceptos sobre riesgo*. Falda del Carmén: CONAE.



- Thom, H. C. (1966). *Some methods of climatological analysis. Technical note N° 81*. Ginebra: World Meteorological Organization.
- Tizio, R. (1993). Fisiología y bioquímica del daño por heladas en plantas. *II Jornadas Nacionales de defensa contra las heladas*, (págs. 19-25). Mendoza.
- Torres, M. (2011). Dinámicas socio-espaciales por causa del fenómeno de La Niña en el valle de Ubaté y Chiquinquirá en el primer semestre de 2011. *Perspectivas geográficas Vol. 16/2011*, 83-102.
- UNAL. (1 de Mayo de 2013). *Curso básico de meteorología y climatología*. Obtenido de <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/5000134/index.html>
- UNCCD. (2003). Convención de las Naciones Unidas sobre la desertificación . *Convención de las Naciones Unidas sobre la desertificación* . La Habana: UNCCD.
- UNISDR. (2009). *Terminología sobre Reducción de Riesgo de Desastres* . UNISDR.
- Universidad de Oviedo. (1 de 05 de 2013). *Correlación de Pearson*. Obtenido de [http://www.psico.uniovi.es/Dpto\\_Psicologia/metodos/tutor.6/fcope.html](http://www.psico.uniovi.es/Dpto_Psicologia/metodos/tutor.6/fcope.html)
- Vela Jiménez, J. F., & Vargas Roncancio, M. (2009). caracterización de la dinámica de producción de materia seca del kikuyo (*pennisetum clandestinum*) asociado con árboles y en pastoreo para producción de leche en el trópico alto colombiano. *Revista Ciencia Animal*, 2: 27-40.
- Wood, P. D. (1967). Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature* 216, 164-165.
- Ycaza, P., & Manobanda, N. (2009). Implementación de mapas agroclimáticos. En R. Martinez, A. Mascarenhas, & A. Alvarado, *Guía técnica para la implementación de un sistema regional de información aplicada a la gestión de riesgo agrícola en los países andinos* (págs. 45-60). Guayaquil: Centro Internacional para la investigación del Fenómeno de El Niño - CIIFEN.



## A. Anexo: estaciones climáticas utilizadas en el trabajo

N°	CODIGO	ESTACION	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	MUNICIPIO
1	2120088	El Salitre	5,20	-74,00	3140	TAUSA
2	2120138	El Encanto	5,20	-73,90	3150	TAUSA
3	2120542	Tibaitata	4,69	-74,21	2543	MOSQUERA
4	2120548	La Iberia	5,00	-73,70	2760	CHOCONTA
5	2120570	Guasca	4,88	-73,87	2750	GUASCA
6	2120571	Jardín Botánico	4,67	-74,10	2552	BOGOTA
7	2120572	Granja San Jorge	4,52	-74,20	2900	SOACHA
8	2120574	Silos	5,10	-73,70	2709	CHOCONTA
9	2120579	Apto El Dorado	4,70	-74,15	2547	BOGOTA
10	2120585	El Colombiano	5,03	-73,85	2567	SESQUILE
11	2120587	El Salitre	4,74	-74,33	2570	BOJACA
12	2120589	Guanata	4,89	-74,05	2550	CHIA
13	2120591	La Cosecha	4,99	-74,00	2600	ZIPAQUIRA
14	2120592	Suasque	4,82	-73,96	2650	SOPO
15	2120594	Villa Ines	4,83	-74,38	2590	FACATATIVA
16	2120596	Tachi	4,83	-74,38	2590	FACATATIVA
17	2120597	Hacienda Santa Ana	5,09	-73,88	2572	NEMOCON
18	2120598	Granja Providencia	4,80	-74,20	2560	TENJO
19	2120601	Hacienda Loretoky	5,09	-73,80	2550	SUESCA
20	2120602	Santillana	4,91	-74,11	2575	TABIO
21	2120603	San Cayetano	4,92	-74,18	2650	SUBACHOQUE
22	2120606	Casablanca	4,72	-74,25	2575	MADRID
23	2120623	Hacienda Las Vegas	4,66	-74,15	2543	BOGOTA DC
24	2306507	Esc Voc Pacho	5,20	-74,20	1940	PACHO
25	2306510	Sabaneta	4,90	-74,31	2475	SAN FRANCISCO
26	2306512	La Cabrera	5,10	-74,10	2000	PACHO
27	2312019	Los Pinos	5,20	-74,00	3477	TAUSA
28	2312514	Apto Furatena	5,50	-74,20	1250	QUIPAMA
29	2401026	La Candelaria	5,50	-73,60	2320	RÁQUIRA
30	2401027	El Pino	5,30	-73,90	2575	SUTATAUSA
31	2401031	Los Arrayanes	5,60	-73,70	2575	TINJACÁ
32	2401033	El Espino	5,30	-73,70	2550	LENGUAZAQUE
33	2401036	Monserate	5,40	-73,80	2865	FUQUENE
34	2401037	Socota	5,40	-73,90	3080	CARUPA
35	2401038	El Puente	5,40	-73,70	2810	GUACHETA
36	2401042	Caldas	5,60	-73,90	2655	CALDAS

37	2401043	Esclusa Merchan	5,70	-73,80	2550	SABOYA
38	2401044	Tres Esquinas	5,40	-73,90	3130	SUSA
39	2401046	Sta Sofia	5,70	-73,60	2370	SANTA SOFIA
40	2401049	El Pedregal	5,20	-73,90	2900	SUTATAUSA
41	2401051	El Zarzal	5,50	-73,70	2900	RÁQUIRA
42	2401052	Hato1	5,30	-73,90	2985	CARUPA
43	2401053	Hato2	5,30	-73,90	2974	CARUPA
44	2401057	Hato6	5,20	-73,90	3105	CARUPA
45	2401058	Hato7	5,20	-73,90	3271	CARUPA
46	2401509	Santa Sofía	5,70	-73,60	2300	SANTA SOFIA
47	2401511	La Boyera	5,30	-73,90	2610	UBATE
48	2401512	Isla de Santuario	5,50	-73,70	2580	FÚQUENE
49	2401513	Simijaca	5,50	-73,90	2572	SIMIJACA
50	2401519	Novilleros	5,30	-73,80	2550	UBATE
51	2401522	Villa Carmén	5,50	-73,50	2600	SAMACA
52	2401530	Villa De Leyva	5,39	-73,32	2215	VILLA DE LEYVA
53	2401531	San Miguel de Sema	5,50	-73,70	2600	SAN MIGUEL DE SEMA
54	2403512	Surbata Bonza	5,80	-73,07	2485	DUITAMA
55	2403513	Uptc	5,33	-73,21	2690	TUNJA
56	2403517	Granja Tinguavita	5,75	-73,12	2470	PAIPA
57	2403525	Chita	6,11	-72,27	2888	CHITA
58	2403531	Chiscas	6,32	-72,30	2350	CHISCAS
59	2403532	Sativanorte	6,07	-72,42	2594	SATIVANORTE
60	2403534	Aeropuerto Lleras	5,40	-72,58	2500	SOGAMOSO

## B. Anexo: metodología utilizada para el control de calidad y llenado de la información climática

Se utilizó la metodología de control de calidad de datos propuesta por el IDEAM (2011) en el marco del proyecto “Plan regional integral de cambio climático de cambio climático para la región capital PRICC” basada en el control, homogenización (obtención, validación, verificación y procesamiento de la información) y llenado de datos faltantes en las series.

**Figura B-1:** filtros de calidad aplicados a la Información de las series históricas de datos climáticos utilizados en el proyecto (Dorado & León, 2011).



Se confrontó la ubicación geográfica y los registros de elevación sobre el nivel del mar reportados en cada estación meteorológica con un modelo digital de elevación del IGAC para corroborar la información del catálogo.

Cada serie histórica de datos se filtró utilizando los siguientes pasos: la cual consiste en los siguientes pasos:

- **Porcentaje de datos faltantes en las series:** Con el fin de utilizar series de datos que cumplan los requisitos básicos de calidad definidos por el IDEAM, se seleccionaron las series de datos con menos del 30% de datos faltantes. Ejemplo, una estación con una serie con 10.000 datos se selecciona si tiene como máximo 3000 datos faltantes.
- **Filtro físico:** En esta etapa se deben establecer los criterios de calidad a partir de los cuales se deben validar cada uno de los datos de las series históricas. Algunos de los criterios responden a las zonas de trabajo como los rangos climáticos permitidos que se basan en la climatología generada por el IDEAM. En este estudio se plantearon los siguientes criterios:
  - Los valores de precipitación no deben ser negativos.
  - El valor de la temperatura máxima debe ser mayor al de la temperatura mínima ( $T^{\circ}\text{Max} > T^{\circ}\text{Min}$ ).
  - Si la diferencia aritmética entre la temperatura máxima y la temperatura mínima es mayor a  $10^{\circ}\text{C}$  en tiempos comparables, se debe verificar la posibilidad de su ocurrencia asociándolo con eventos de escala sinóptica o eventos de variabilidad climática.
  - Los valores de humedad relativa no pueden ser superiores al 100%.
  - El brillo solar a escala mensual no puede ser superior a 360 horas.
- **Filtro grueso:** permite identificar y eliminar datos atípicos dentro de la serie de datos a través de dos estrategias:
  - Se hace una gráfica de la serie temporal de cada variable por estación meteorológica y se revisa visualmente su continuidad. Estas gráficas permiten identificar rápidamente quiebres significativos en las series o valores anómalos que deben ser revisados para tomar la decisión de eliminarlos o no.
  - Utilizar el criterio de desviaciones estándar de  $4\sigma$  a  $3\sigma$  para definir si existen datos atípicos que no se encuentren dentro de esos límites y puedan entonces responder a la influencia de fenómenos de variabilidad climática inter anual (El Niño – La Niña), a un evento extremo aislado o a un error de digitación.

## Homogenización

El tratamiento estadístico de datos requiere, como condición básica, que éstos sean de la misma naturaleza, del mismo origen, obtenidos mediante observaciones y mediciones que hayan seguido procedimientos y métodos semejantes. Las series de datos climatológicos disponibles son muestras extraídas de una población cuya existencia y permanencia se suponen de antemano (Thom, 1966). El primer problema consiste en determinar la homogeneidad de la muestra, ya que muchas de éstas no cumplen con esta condición esencial y, lo que es peor, no se tiene ningún registro documental de las posibles heterogeneidades (Montealegre J. E., 1990). Para la detección y corrección de las heterogeneidades de las series se utilizó la prueba de rachas o run-test y el método de dobles masas los cuales se explican de manera resumida a continuación:

- **Determinación de la homogeneidad Run-test:** La prueba de rachas, es una prueba estadística no paramétrica, que busca establecer la homogeneidad en las series, en cada una de las estaciones. El análisis se puede realizar mensual o anualmente. Para ello, se disponen los datos en forma cronológica y de este conjunto se obtiene la mediana. Luego se comparan, uno a uno, los datos con la mediana. Asignando las letras A o B, se determina el número de secuencias (Ns) por arriba y por debajo de la mediana y con este valor se determina si la serie es homogénea o no (UNAL, 2013).

Se puede calcular el valor de los parámetros homogéneos por medio de las siguientes ecuaciones:

$$P_{10} = -1.83 + (0.931N) \quad (B.1)$$

$$P_{90} = -2.38 + (1.104N) \quad (B.2)$$

Dónde:

$N$  es el número de datos dividido 2.

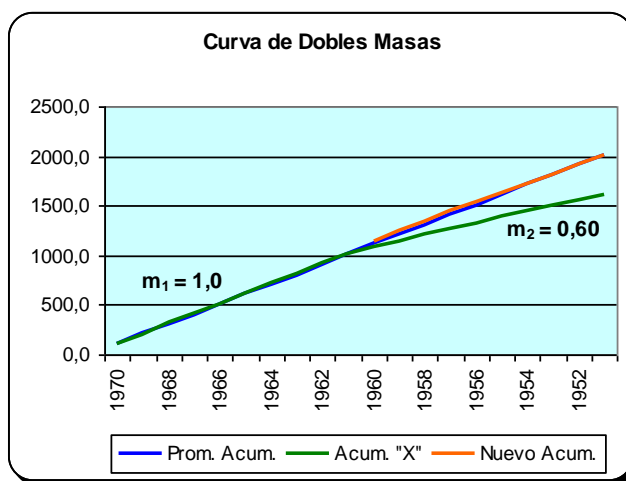
Los valores por debajo de  $P_{10}$  son **tendencias**, y por encima de  $P_{90}$  son **oscilaciones**. Los términos contenidos entre  $P_{10}$  y  $P_{90}$  indican **HOMOGENEIDAD** de la serie.

- **Método de dobles masas:** debido a que el Run-Test sólo permite detectar las heterogeneidades, el método de dobles masas además de detectar estas inconsistencias también permite corregirlas. El método se aplica cuando puede

sucedan un cambio relativo en la variable observada, debido a causas ajenas al comportamiento de la misma (cambio de instrumento, construcciones civiles, cambio de observador, unidades diferentes, etc.). También se aplica para el relleno de datos faltantes (interpolación) o para extender una serie incompleta al periodo de comparación (extrapolación) (UNAL, 2013).

Se analiza la inconsistencia de la serie “X” a través de una serie de datos de otra estación o estaciones “Y” cuya homogeneidad haya sido verificada. Posteriormente se acumulan los datos de la serie y se construye una gráfica de coordenadas cartesianas, colocando en el eje de abscisas (eje y) los promedios acumulados de la serie de datos de la estación representativa y en las ordenadas (eje x) las lluvias anuales acumuladas de la estación problema (UNAL, 2013).

**Figura B-2:** curva de dobles masas, donde se observan los tramos identificados detectando las heterogeneidades



Si los puntos aparecen en una línea recta los datos iniciales de la estación problema son válidos sin corrección, en caso que se presenten cambio de pendiente se genera una relación entre las pendientes generando una constante “K”, multiplicando ésta por los valores inconsistentes, por lo que se homogenizan los valores anómalos (UNAL, 2013).



### Llenado de los datos

Una vez depuradas las bases de datos de las series climáticas se utilizaron los siguientes métodos de llenado de datos:

- **Método de las proporciones:** se utiliza para realizar el relleno de datos faltantes (precipitación, en este caso) cuando no existen estaciones patrón para hacer la comparación.

$$mf = (Pmf) * \left( \frac{Taf}{Tap - Pmf} \right) \quad (B.3)$$

Dónde:

mf = mes faltante

Pmf = promedio mes faltante

Taf = Total anual del mes faltante

Tap = Total anual promedio

- **Método de la razón de valores normales:** Se utiliza cuando existen datos de otras estaciones con características fisiográficas y climatológicas semejantes a la serie incompleta considerándola representativa. En este caso se utilizan los valores promedio de la variable de interés.

$$P_x = \left( \frac{N_x}{n} \right) * \left( \frac{p_1}{N_1} + \frac{p_2}{N_2} + \dots + \frac{p_n}{N_n} \right) \quad (B.4)$$

Dónde:

P<sub>x</sub> = dato faltante

n = Total de estaciones de referencia

N = Promedio anual de la variable

- **Método de inverso de la distancia al cuadrado:** Se utiliza cuando existen datos de otras estaciones representativas de la estación incompleta, pero se desconocen sus valores promedio.

$$mf = \left( \frac{\frac{p_1 + p_2 + \dots + p_n}{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}}{\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \dots + \frac{1}{d_n^2}} \right) \quad (B.5)$$

Dónde:

mf= dato faltante (precipitación de la estación incompleta)

n= Total de estaciones de referencia

$P_{1...n}$  = Precipitación de las estación 1 ... n

$d_{1...n}$  = Distancia de la estación 1 ...n a la estación incompleta

- **Método de la razón de valores normales:** Si no existen datos de comparación o no hay suficientes datos para aplicar las formulas anteriores, se recurre al método de la razón de valores normales. En este caso se construye una estación patrón a partir de un grupo de estaciones que se consideran representativas del punto de interés dado las características fisiográficas y climatológicas en donde se ubican.

$$y = mx + b \quad (B.6)$$

Pasos:

- a. Se obtienen los datos mensuales de la estación patrón con base en el promedio de las otras estaciones.
- b. Se calcula el valor acumulado o promedio de la “variable” de interés en todas las estaciones utilizadas para generar la estación patrón
- c. Se hace una gráfica de la variable de cada una de las estaciones contra la estación patrón y se obtienen las ecuaciones de regresión lineal correspondientes
- d. Mediante las ecuaciones de regresión obtenidas, se calculan los datos faltantes

Aunque se utilizaron todos los métodos descritos para el llenado de las series, principalmente de precipitación y temperatura a escala mensual, el método mayormente utilizado fue Razón de Valores Normales, ya que a partir de practicar la homogenización de las series climáticas por el método de dobles masas se obtiene la ecuación para realizar el llenado de los datos.

## **C. Anexo: eventos climáticos extremos**

Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), podría generar un incremento en la temperatura media del planeta de alrededor de 1.4 °C a 4 °C para 2100, afectando la variabilidad climática a nivel global (CEPAL, 2011). Una consecuencia directa de estos cambios son el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, tales como: huracanes (a nivel oceánico), sequías, heladas, precipitaciones extremas o excesos de precipitación entre otros.

Por lo anterior, los eventos climáticos extremos se definen como la ocurrencia de un valor de una variable meteorológica o climática por encima (o por debajo) de un valor de umbral cercano al extremo superior (o inferior) de la media de valores observados de la variable (IPCC, 2012). Otra definición señala que un evento extremo es un episodio, suceso o evento meteorológico que es raro, o infrecuente, según su distribución estadística para un lugar determinado, entendiendo a “raro” como todo episodio que se encuentre por encima del percentil 90 o por debajo del 10 en la función de probabilidad observada (IPCC, 2007).

A continuación se nombran los eventos extremos más comunes en el Altiplano Cundiboyacense, enfocándose en las heladas como eje central del proyecto.

- **Excesos de precipitación**

Generalmente los excesos de precipitación, se refieren a todo “exceso de lluvia” en que se transforma en escorrentía, en otras palabras cuando hay lluvias, una parte de ésta se evapora y la otra infiltra el suelo y percola hasta que se incorpora al almacenamiento a largo plazo de embalses y lagos así como al caudal base drenajes o ríos, los excesos

que drenan superficialmente o debajo de ésta pueden considerarse como excesos hídricos (METED, 2013).

En el ámbito agropecuario, se suele definir los excesos de precipitación como aquel desequilibrio entre el agua y el oxígeno del suelo, causando pérdidas de rendimientos o hasta la misma muerte del cultivo. Cuando existen excesos de lluvias que pueden causar inundaciones, anegamientos, ascenso del nivel freático entre otros, puede surgir según sea el fenómeno, un daño mecánico a la planta (rompimiento de tallos o arrastre del material) y/o pérdida de la cantidad de oxígeno en el suelo, causando asfixia y posterior muerte de la planta (Seguros Caja Agraria, 1998).

- **Sequías**

La OMM (1975) define a la sequía como aquella deficiencia constante extendida de las precipitaciones, pero ésta no es la única definición que impera en el mundo sobre éste fenómeno climático. La mayoría de expertos señalan que definir que es una sequía es relativamente complejo, debido a multiplicidad de enfoques existentes; pero a nivel climático puede definirse como una deficiencia de precipitación por un periodo extenso de tiempo, que genera déficit hídrico en áreas determinadas, y altera el desarrollo normal de los procesos biofísicos y socioeconómicos de la región afectada (Cadena, 2006)

A nivel agroproductivo existen múltiples definiciones tales como: déficit de precipitación que genera una escasez de agua para cultivos, acueductos, recreación, entre otros propósitos. (Mavi & Tupper, 2004); Anormal periodo seco, prolongado para que la falta de agua cause un desbalance hidrológico en la zona afectada (Hurtado G. , 1986); Fenómeno producido naturalmente por la disminución de lluvias, causando un desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas (UNCCD, 2003)

- **Granizo.**

Otro de los eventos climáticos extremos más relevantes a nivel andino es el de tormentas de granizo conocido comúnmente como “granizadas”. Éstas tormentas se constituyen como un fenómeno atmosférico poco frecuente en el cual se conjugan varias condiciones, tales como: existencia de nubes tipo cumulonimbus; inestabilidad de masas de aire cálido y húmedo por debajo de aire seco y más frío; súbito ascenso de masas de aire y fuerte convección; sobre enfriamiento de gotas de agua que impactan sobre

---

cristales de hielo sirviendo como núcleos para formación del granizo (Rodriguez, Camacho, Jimenez, Duarte, & Villarreal, 2008).

Por otro lado el granizo es definido como nieve y hielo compactados en pequeños bodeques o bolitas con estructura interna dispuesta en capas concéntricas, con una variación en su diámetro de 5 a 50 mm. (Cepeda Arias, 2010)

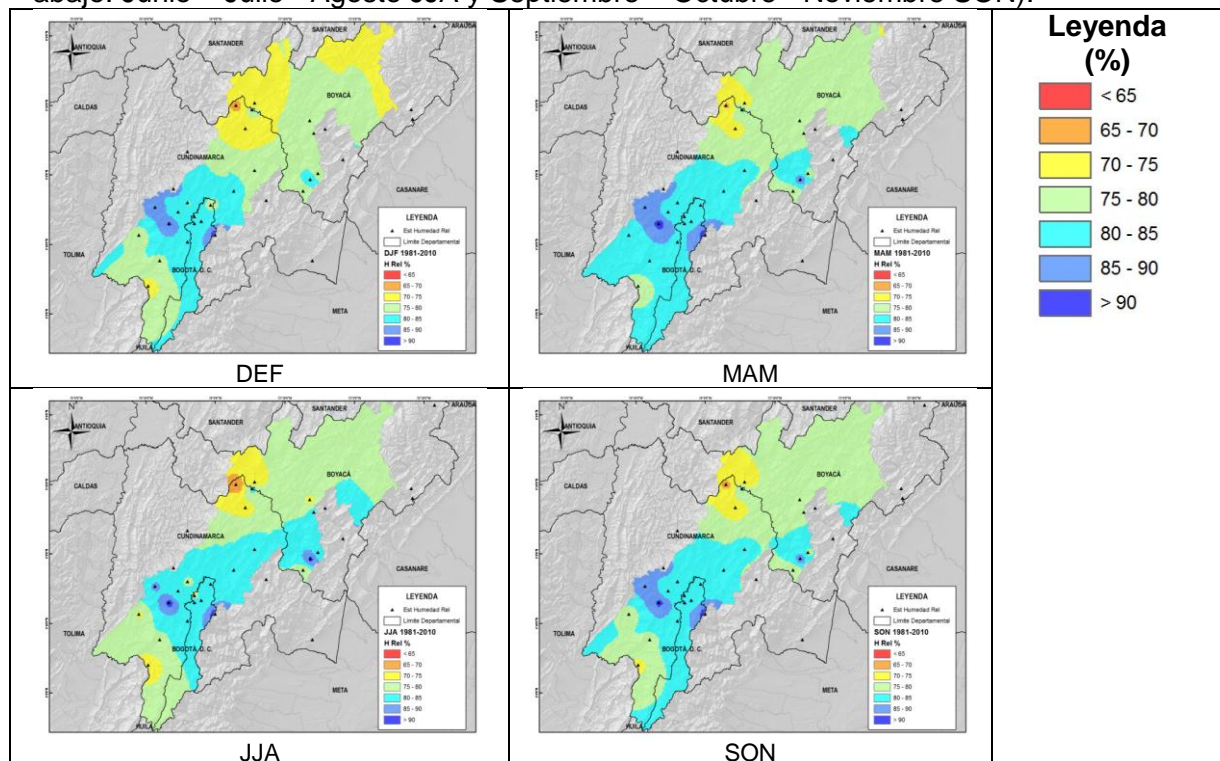


## D. Anexo: caracterización climática de la humedad relativa y brillo solar

- **Humedad relativa**

La humedad relativa presenta un comportamiento relativamente estable a nivel temporal, cuyos valores en el valle de Ubaté y Chiquinquirá, oscilan entre un 60 – 80 % a nivel trimestral, siendo DEF el trimestre donde los promedios de humedad relativa descienden a un rango menor al 70%. En la Sabana de Bogotá, los valores de humedad a lo largo del año descienden por debajo del 80% siendo ésta la zona más húmeda del altiplano.

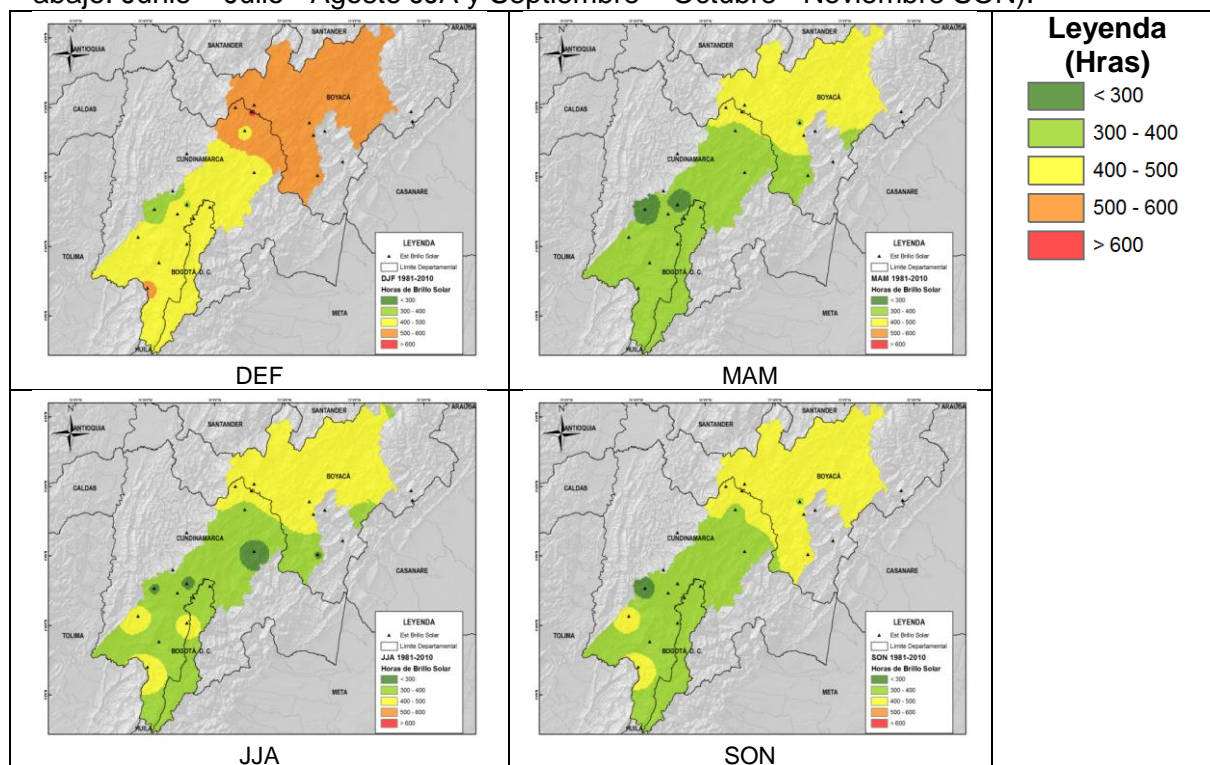
**Figura D-1:** climatología periodo 1981 – 2010 de la humedad relativa en el Altiplano Cundiboyacense (arriba: Diciembre – Enero - Febrero DEF y Marzo – Abril - Mayo MAM; abajo: Junio – Julio - Agosto JJA y Septiembre – Octubre - Noviembre SON).



### • Brillo solar

La insolación o brillo solar, es quizás una de las variables, en conjunto con la precipitación, que más impacta la producción agropecuaria en una región. En la Sabana de Bogotá y en el Sur del Altiplano, el brillo solar siempre es menor que en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá y que en el Valle del Chicamocha. Para DEF, los rangos de brillo solar en la Sabana de Bogotá y Sur del altiplano se encuentran por el orden de 300 a 500 horas trimestrales, mientras para el valle de Ubaté y Chiquinquirá y Valle del Chicamocha, es de 500 – 600 horas trimestrales, siendo el trimestre con mayor insolación de todo el año. En los siguientes trimestres (MAM, JJA y SON), persiste la diferenciación espacial en horas trimestrales pero en ambos casos se reduce; en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá y Valle del Chicamocha, disminuyen de 400 a 500 horas trimestrales y en la Sabana de Bogotá de 300 a 400 horas.

**Figura D-2:** climatología periodo 1981 – 2010 de la Brillo Solar en el Altiplano Cundiboyacense (arriba: Diciembre – Enero - Febrero DEF y Marzo – Abril - Mayo MAM; abajo: Junio – Julio - Agosto JJA y Septiembre – Octubre - Noviembre SON).





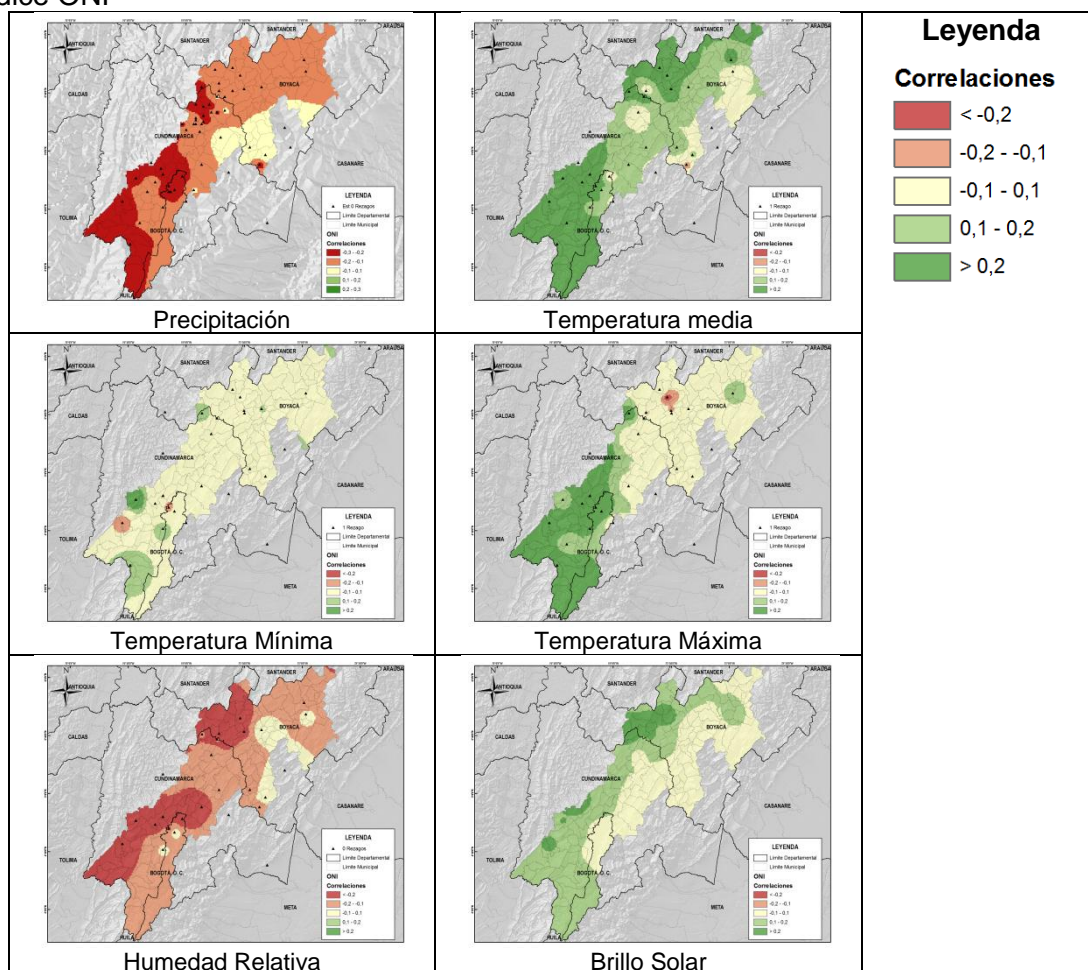
## **E. Anexo: análisis de correlación cruzada entre el índice ONI y las variables climáticas descritas**

A nivel espacial las mayores correlaciones se dan en la sabana de Bogotá y el valle de Ubaté y Chiquinquirá, especialmente con la precipitación, temperatura máxima, temperatura media y humedad relativa, mientras regiones como el valle del Chicamocha y oriente del altiplano las correlaciones no sobrepasan el  $\pm 0.1$ .

El comportamiento climático de la parte oriental de Boyacá, en donde las correlaciones no fueron significativas sugiere que esta área debe estar influenciada por otro tipo de oscilación, el cual debe ser objeto de estudios posteriores.

Realizando correlaciones cruzadas con uno y dos rezagos se observan que los valores mantienen los mismos niveles de asociación con cada una de las variables climáticas (Anexo A), manteniendo la misma estructura a nivel espacial. A medida que los periodos de los rezagos son más amplios, los valores de correlación disminuyen, concluyendo que la inercia de los ENOS se da casi inmediatamente en que se configura el evento.

Montealegre (2009), ratificado por Rojas (2011) que en vez de realizar correlaciones con o sin rezagos, se utilizan las medias móviles de tres meses a fin de filtrar las oscilaciones de tipo estacional, se aumentan los niveles de asociación entre el índice ONI y la precipitación.

**Figura E-1:** mapas de correlación cruzada sincrónica entre variables climáticas y el índice ONI

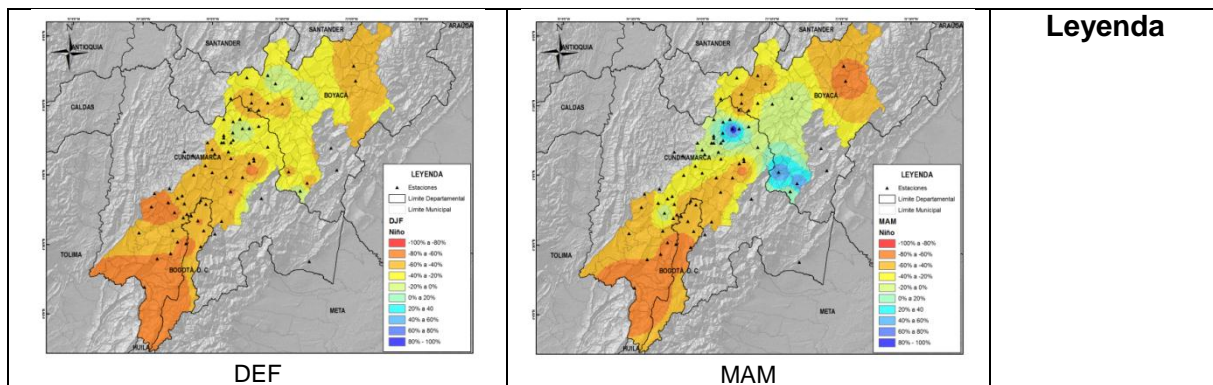
## **F. Anexo: análisis de variabilidad climática interanual para la humedad relativa y brillo solar**

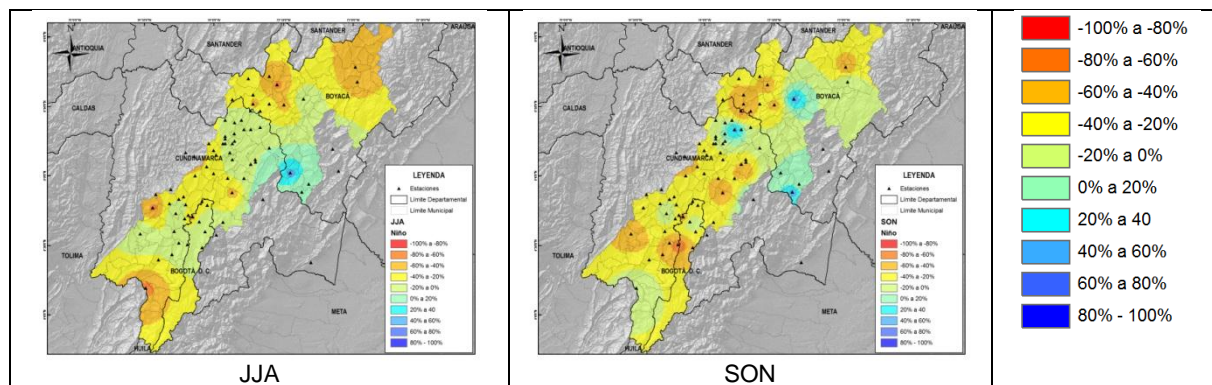
- **Comportamiento de la humedad relativa durante los eventos El Niño y La Niña**

**Evento El Niño:** presenta una fuerte influencia ante la presencia de un evento El Niño, especialmente en los trimestres DEF y MAM. En DEF la humedad relativa tiende a presentar valores por debajo de lo normal a lo largo del Altiplano Cundiboyacense, con valores entre 60 y 80% de probabilidad, a excepción del valle de Ubaté y Chiquinquirá y sur del valle del Chicamocha cuyos valores de probabilidad no sobrepasan el 40%.

El trimestre MAM tiende a presentar un comportamiento similar a DEF, con diferencias notables en el sur del valle de Ubaté y Chiquinquirá donde los valores de probabilidad tienden a llegar hasta un 80% que la humedad relativa presente registros por encima de lo normal. En el segundo semestre la influencia de El Niño decrece significativamente, quedando con valores de probabilidad no mayores al 40% tanto por debajo como por encima de lo normal a lo largo del altiplano.

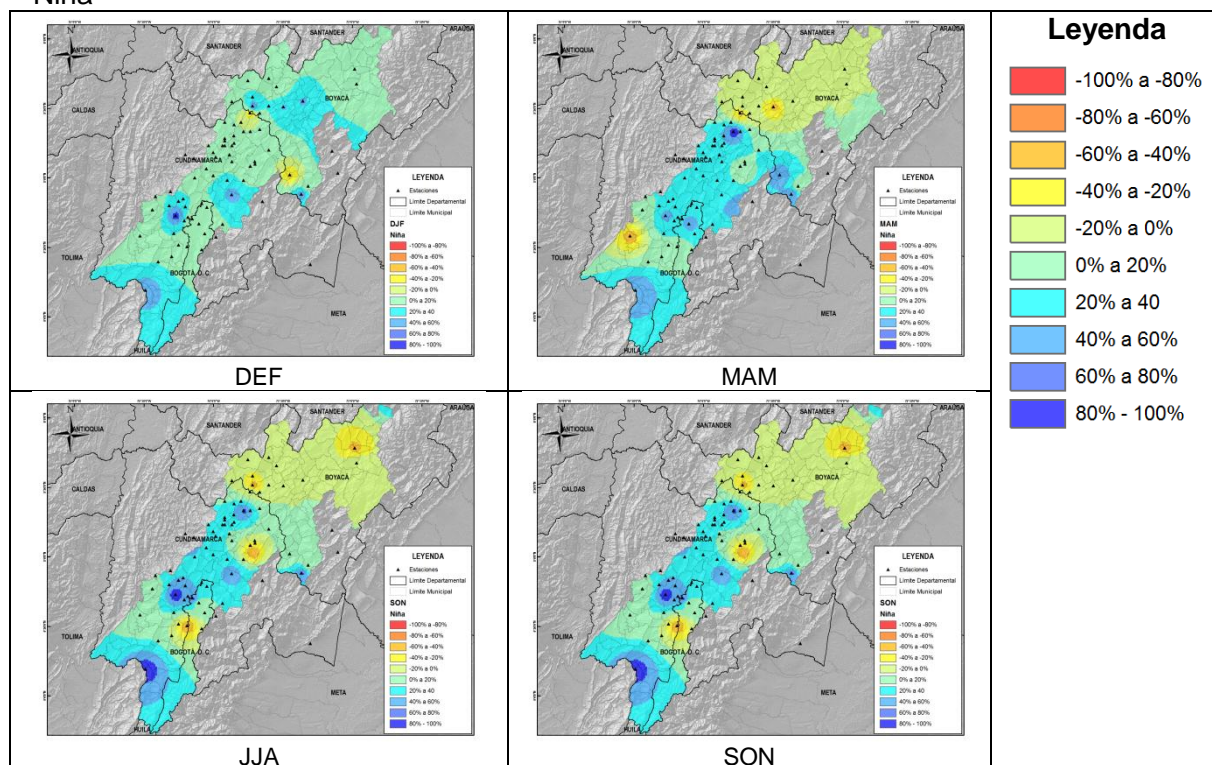
**Figura F-1:** probabilidad de ocurrencia de la humedad relativa bajo la influencia de El Niño





**Evento La Niña:** existe una influencia ligera de La Niña sobre el comportamiento de dicha variable ya que a lo largo del año el comportamiento tiende a ser similar con valores probabilidad que reflejan comportamientos cercanos a lo normal. A nivel espacial el comportamiento es muy similar que el temporal, ya que a lo largo del altiplano la humedad tiende a comportarse dentro de lo normal.

**Figura F-2:** probabilidad de ocurrencia de la humedad relativa bajo la influencia de La Niña



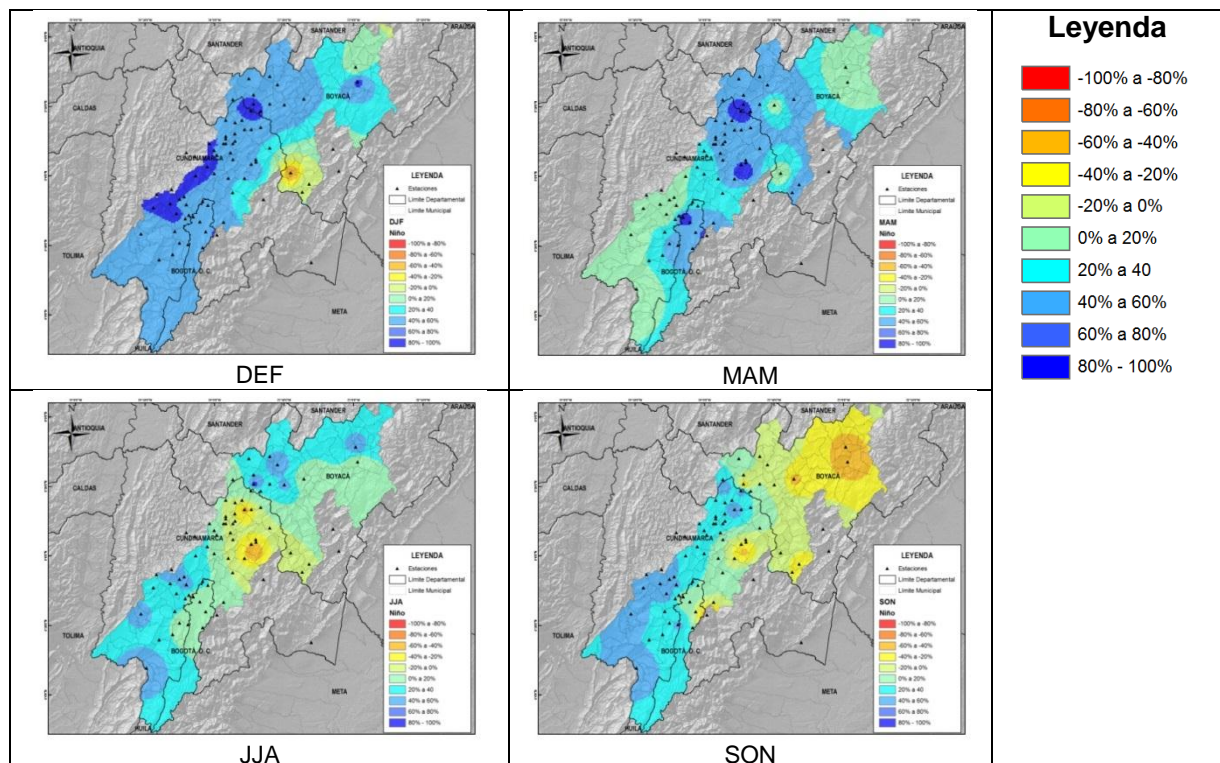
• **Comportamiento de la humedad relativa durante los eventos El Niño y La Niña**

**Evento El Niño:** en el trimestre DEF, gran parte del Altiplano Cundiboyacense, a excepción de la parte norte y oriente, los valores de probabilidad se encuentran entre un 60 y 80% de que se presenten más horas de brillo solar, ratificando lo que sucede con la precipitación cuyos valores se reducen notablemente ante la escasa nubosidad.

Para MAM se reduce notablemente la influencia de El Niño, dado que en el valle de Ubaté y Chiquinquirá, valle del Chicamocha y sabana de Bogotá, la probabilidad se mantuvo con los mismos valores que los del trimestre DEF.

En el segundo semestre la influencia de El Niño decrece significativamente, quedando con valores de probabilidad no mayores al 40% tanto por debajo como por encima de lo normal a lo largo del altiplano.

**Figura F-3:** probabilidad de ocurrencia del brillo solar bajo la influencia de El Niño



**Evento La Niña:** el primer trimestre del año (DEF), muestra una tendencia del brillo solar ante un evento La Niña a presentar valores por debajo de lo normal (menos horas de

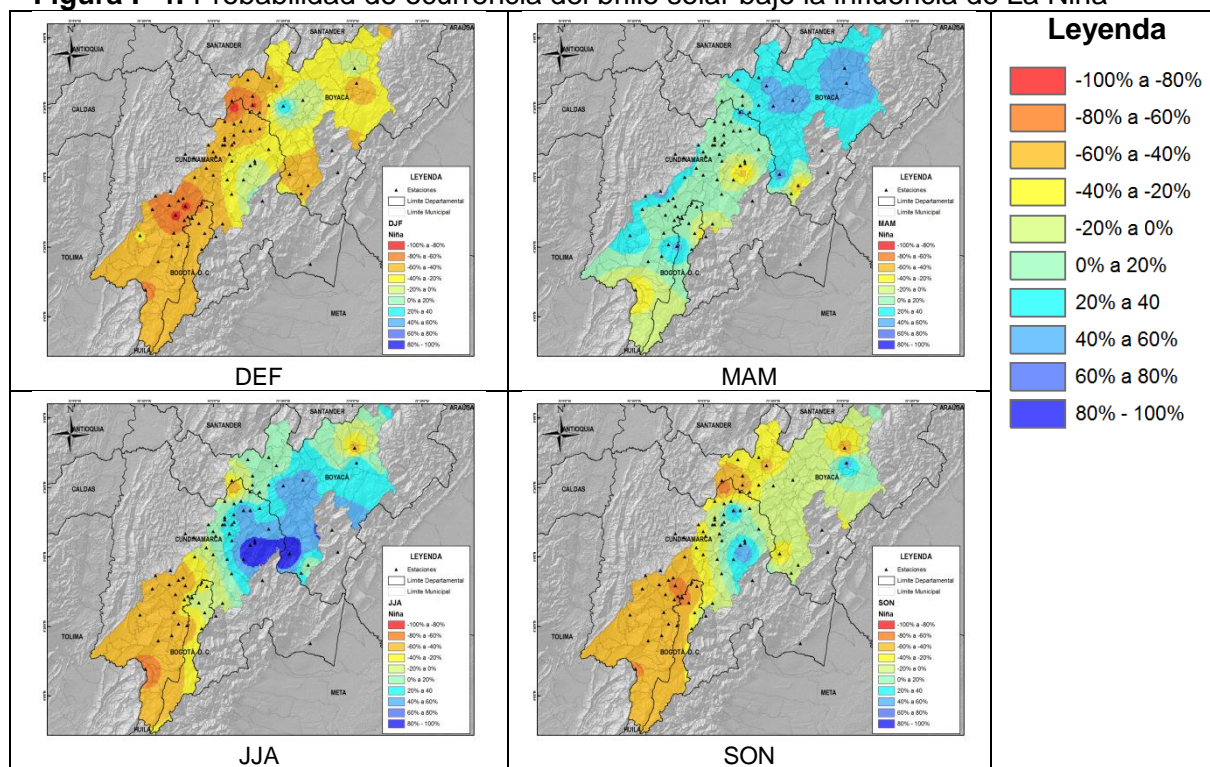


brillo solar), dicho comportamiento es lógico ya que la precipitación aumenta y por ende la nubosidad. Especialmente las mayores probabilidades se presentan a lo largo de la sabana de Bogotá y valle de Ubaté y Chiquinquirá, contrastando con el valle del Chicamocha y oriente del altiplano, cuyos valores de probabilidad tienden a comportarse dentro de lo normal.

En MAM el brillo solar muestra un comportamiento cercano a lo normal, salvo el norte y centro del valle del Chicamocha con intervalos de probabilidad del 40 al 60% que se presenten valores por encima de lo normal.

El segundo semestre del año muestra condiciones diversas a lo largo del altiplano, zonas como el oriente de la región muestran tendencia a presentar valores por encima de lo normal (80 – 100% para JJA y 20 – 40% para SON), mientras el sur y algunas zonas del occidente (parte del valle de Ubaté y Chiquinquirá y sabana de Bogotá) muestran tendencia a presentar valores por debajo de lo normal, menores horas de brillo solar.

**Figura F-4:** Probabilidad de ocurrencia del brillo solar bajo la influencia de La Niña



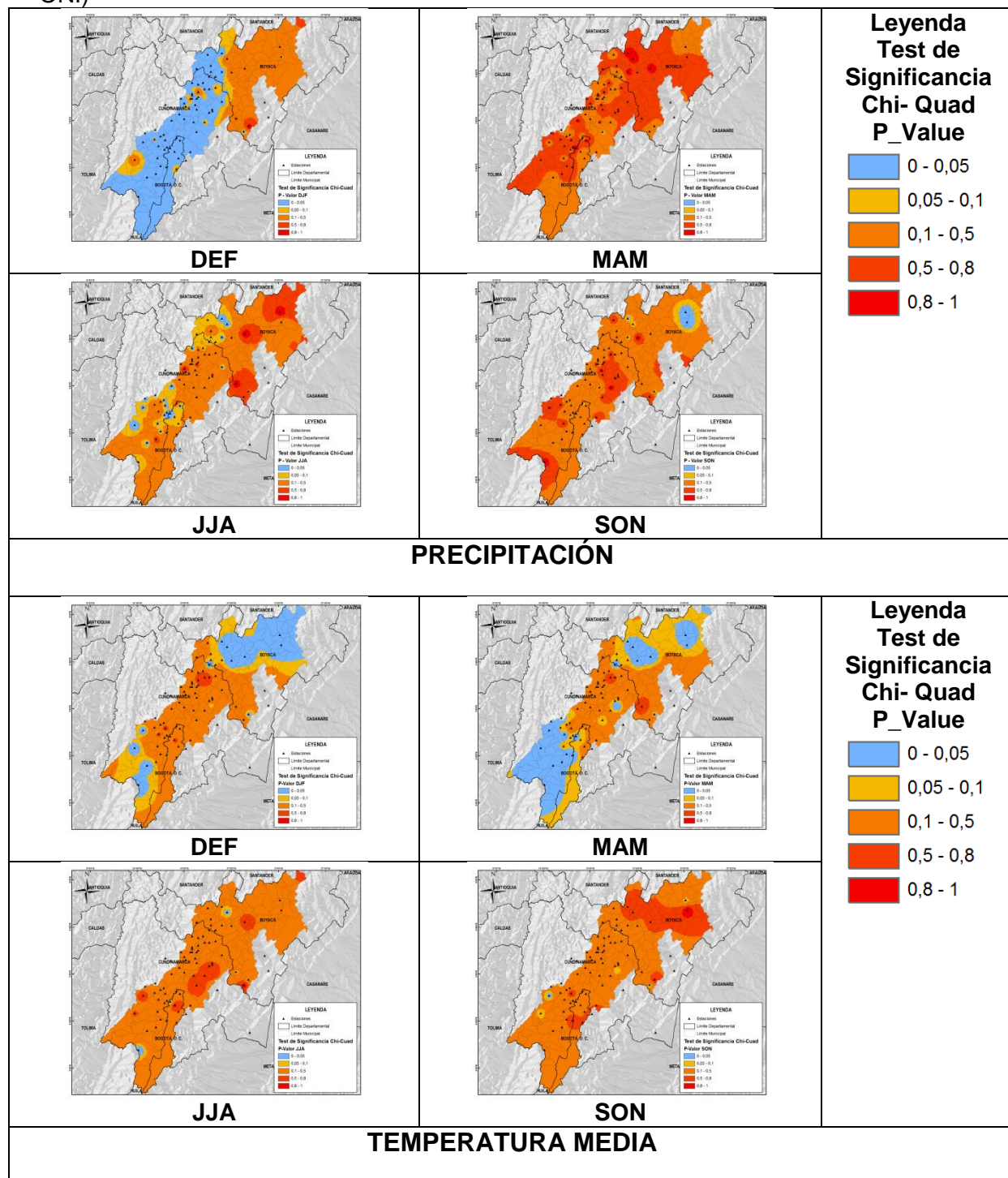
- **Prueba de significancia para todas las variables**

Se elaboraron tablas de contingencia por cada variable. Utilizando la prueba estadística de independencia  $\chi$ -cuadrado se estableció la relación entre los valores de las variables y la ocurrencia de eventos ENOS. Dicha prueba estadística nos sirve para revisar si dos características cualitativas están relacionadas entre sí, para éste caso si eventos ENSO se encuentran relacionados con el comportamiento de las variables climáticas, categorizadas en: por debajo de lo normal, dentro de lo normal y por encima de lo normal.

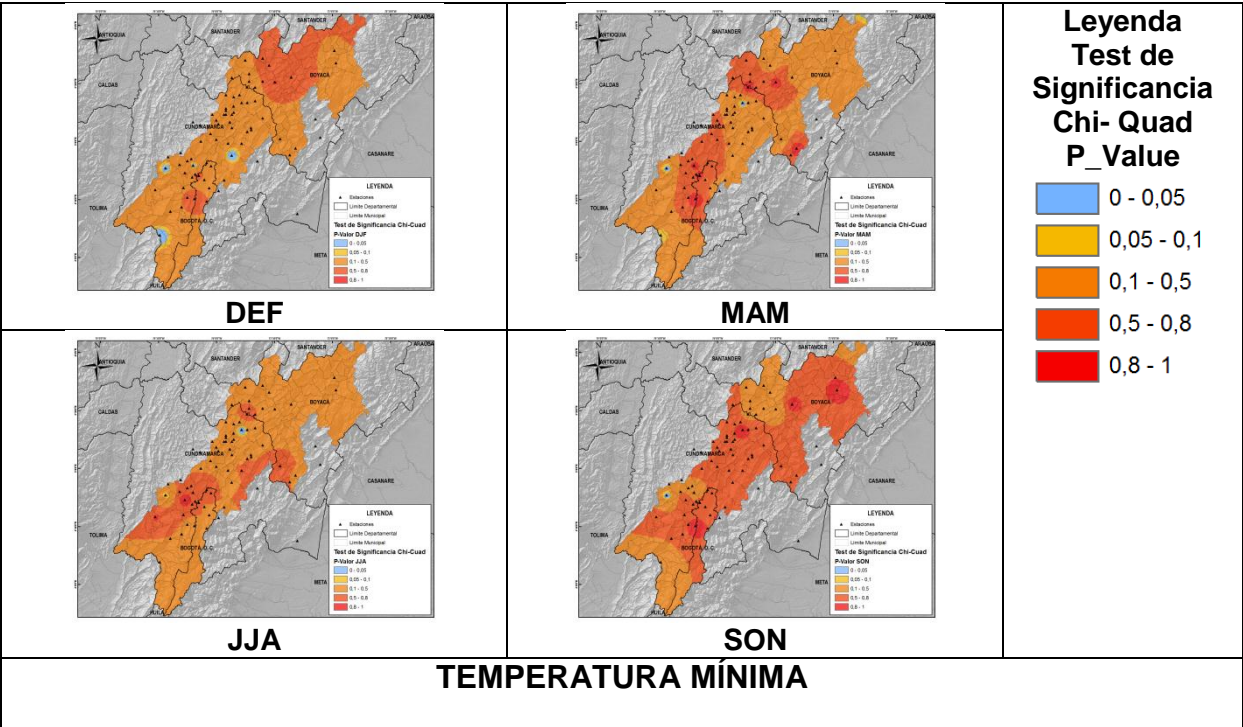
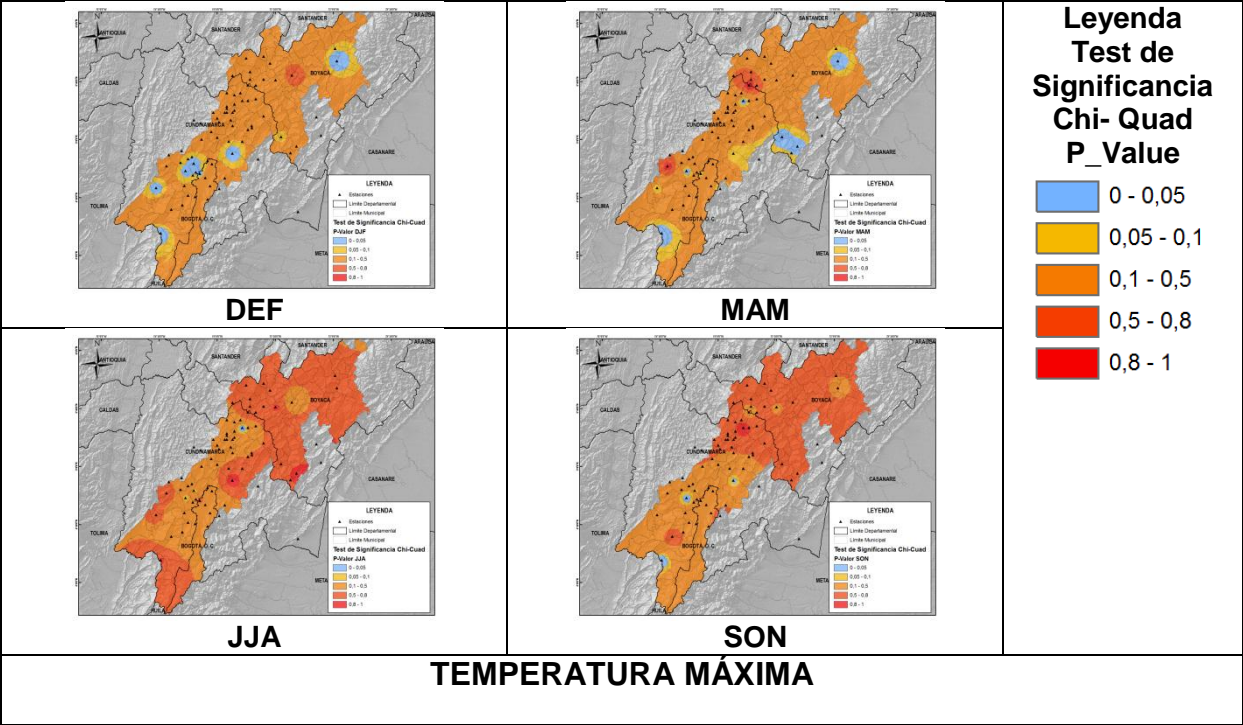
Para el contraste de hipótesis ( $H_0$ : las variables no se encuentran relacionadas y  $H_a$ : las variables se encuentran relacionadas) se decidió utilizar el nivel de significancia al 95%.

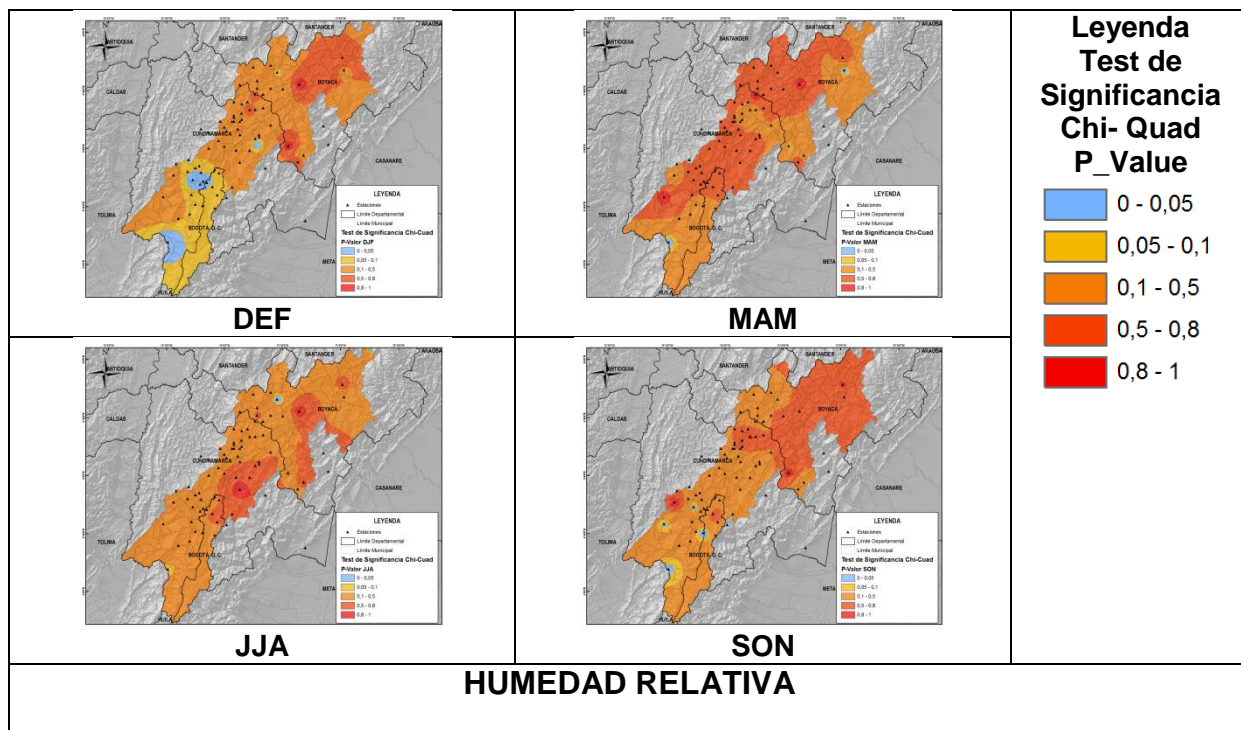
Como resultado se obtuvo que la mayoría de casos, los valores de precipitación del trimestre DEF y de la temperatura media en los trimestres DEF y MAM presentaron valores de P\_Value inferiores a 0.05, confirmando la hipótesis de que la probabilidad de ocurrencia de estas variables y los eventos ENOS si están relacionados.

De las otras variables solamente un número reducido de estaciones presentaron valores del P\_Value inferiores a 0,05 en el trimestre DEF; En los otros trimestres el P\_Value fue superior al 0.05, lo que sugiere que los cambios de precipitación no tienen relación con la ocurrencia de eventos ENOS.

**Figura F-5:** test de significancia (independencia de las variables climáticas y el índice ONI)







## **G. Anexo: Análisis de frecuencia relativa de las heladas por cada clasificación**

- **Enfriamientos**

En el Altiplano Cundiboyacense se observa que los enfriamientos, temperaturas mínimas entre 2°C y 0°C, pueden ocurrir en cualquier época del año (fig. G-1), salvo algunas estaciones como son Granja San Jorge en la sabana de Bogotá, Isla de santuario en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá, y UPTC en el Valle del Chicamocha, emplazadas cerca de cuerpos de agua y grandes ciudades (embalse del Muña, Laguna de Fúquene y en la ciudad de Tunja).

En general las épocas de mayor ocurrencia de enfriamientos se encuentran en los meses de diciembre, enero y febrero cuya probabilidad puede llegar hasta el valor de 0.8, principalmente en estaciones como Apto Lleras (Sogamoso), Granja Providencia (Tenjo), Casablanca (Madrid), Suasuke (Sopo), entre otras, mientras estaciones representativas del valle de Ubaté y Chiquinquirá como Simijaca (Simijaca) e Isla de Santuario (Fúquene), no sobrepasan el valor de 0.4.

En la década final de junio y los meses de julio, agosto y septiembre, siendo éste último mes el periodo de transición de la segunda temporada seca a la segunda temporada lluviosa, la probabilidad que se presenten enfriamientos oscila entre 0.1 y 0.7 a lo largo del altiplano. En gran parte de las estaciones, el mes de septiembre presenta los mayores valores de probabilidad de la época, concluyendo que los periodos de transición suelen presentar condiciones que afectan el comportamiento de las variables climáticas que propician el desarrollo de éstos eventos, tal como escasa nubosidad y poca humedad ambiental, asociadas a factores sinópticos.



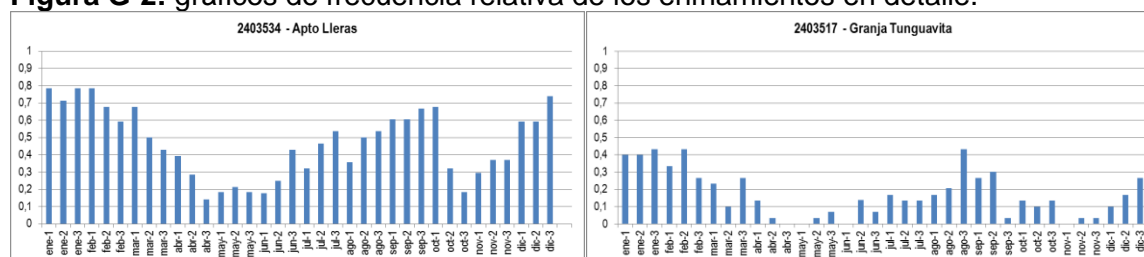
Como se mencionó anteriormente, los enfriamientos pueden ocurrir en cualquier época del año, sea periodo lluvioso o seco, pero éstos últimos periodos suelen presentar mayores condiciones para el desencadenamiento de éstos eventos. Además los periodos de transición, especialmente de seco a lluvioso, suelen ser épocas donde pueden ocurrir enfriamientos.

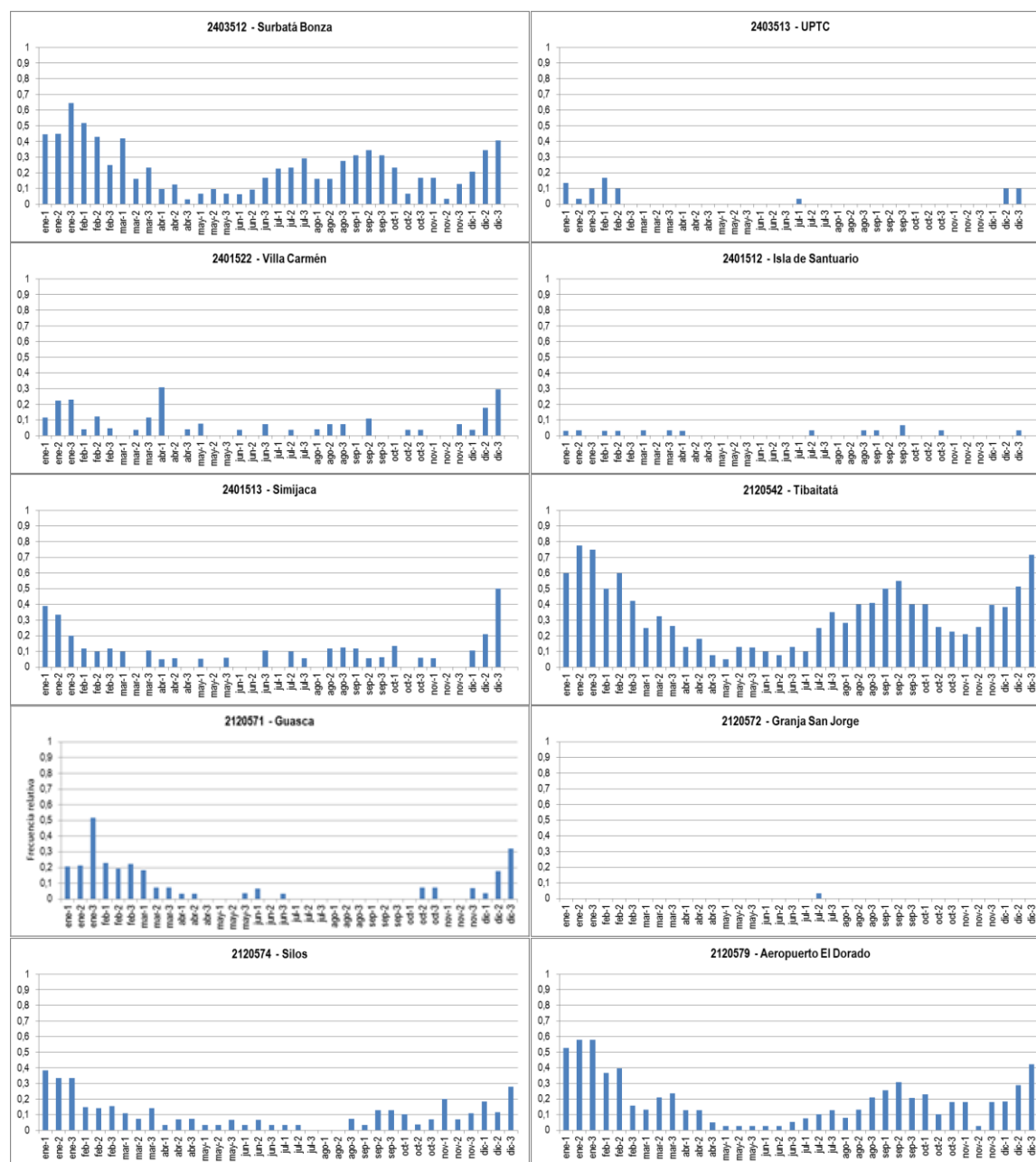
En la década final de junio y los meses de julio, agosto y septiembre, siendo éste último mes el periodo de transición de la segunda temporada seca a la segunda temporada lluviosa, la probabilidad que se presenten enfriamientos oscila entre 0.1 y 0.7 a lo largo del altiplano. En gran parte de las estaciones, el mes de septiembre presenta los mayores valores de probabilidad de la época, concluyendo que los periodos de transición suelen presentar condiciones que afectan el comportamiento de las variables climáticas que propician el desarrollo de éstos eventos, tal como escasa nubosidad y poca humedad ambiental, asociadas a factores sinópticos.

Como se mencionó anteriormente, los enfriamientos pueden ocurrir en cualquier época del año, sea periodo lluvioso o seco, pero éstos últimos periodos suelen presentar mayores condiciones para el desencadenamiento de éstos eventos. Además los periodos de transición, especialmente de seco a lluvioso, suelen ser épocas donde pueden ocurrir enfriamientos.

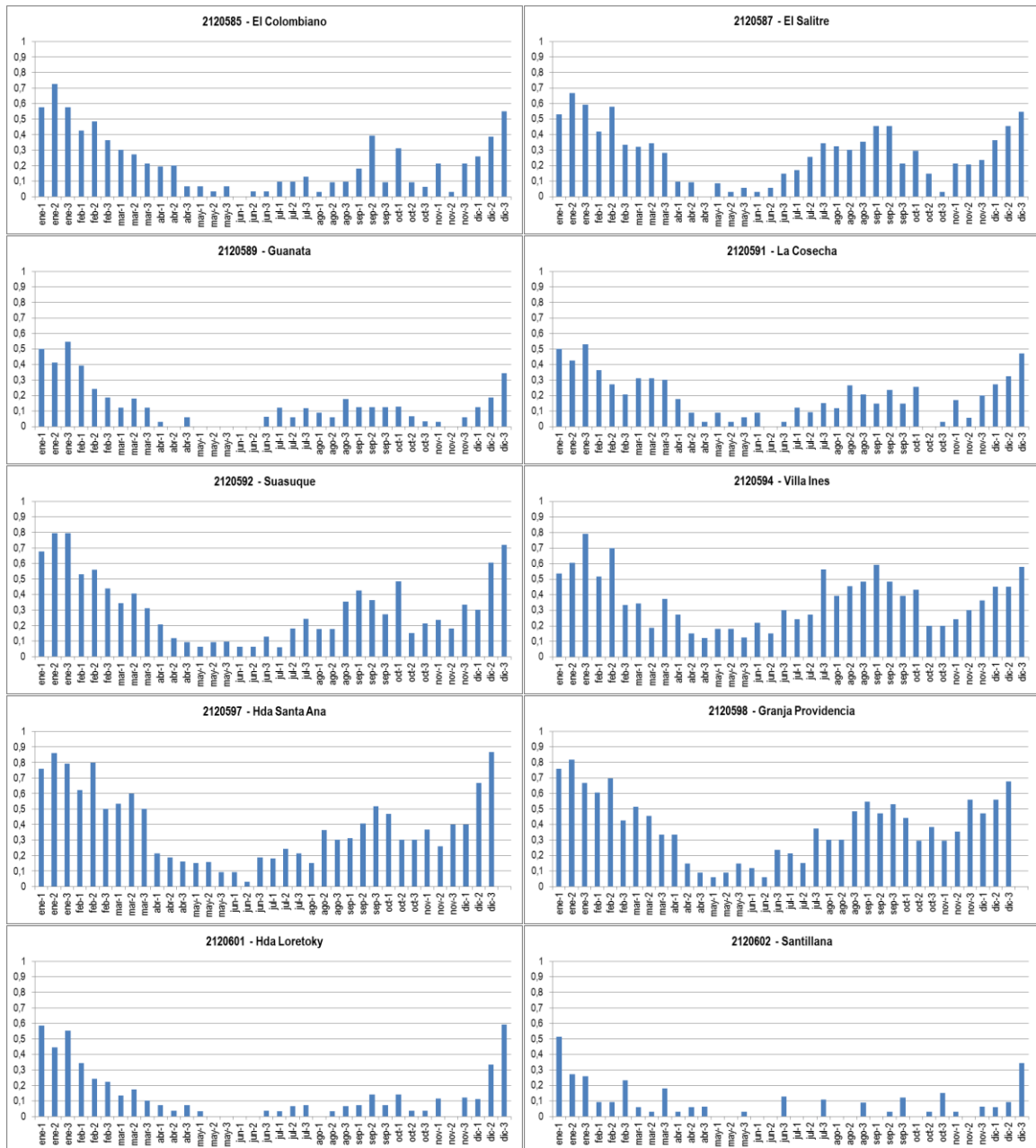
Por otro lado los meses de marzo, abril y mayo, pertenecientes a la primera temporada de lluvias y octubre, noviembre (exceptuando septiembre por razones que ya se comentaron anteriormente), meses pertenecientes a la segunda temporada de lluvias, presentaron las más bajas probabilidades de ocurrencia de enfriamientos en el año, oscilando entre 0 y 0.4.

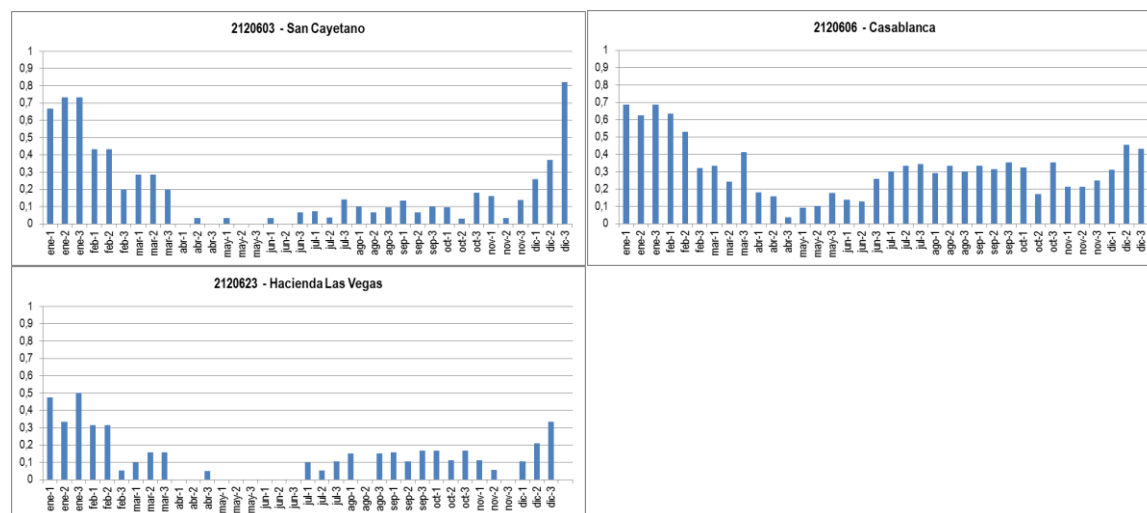
**Figura G-2:** gráficos de frecuencia relativa de los enfriamientos en detalle.





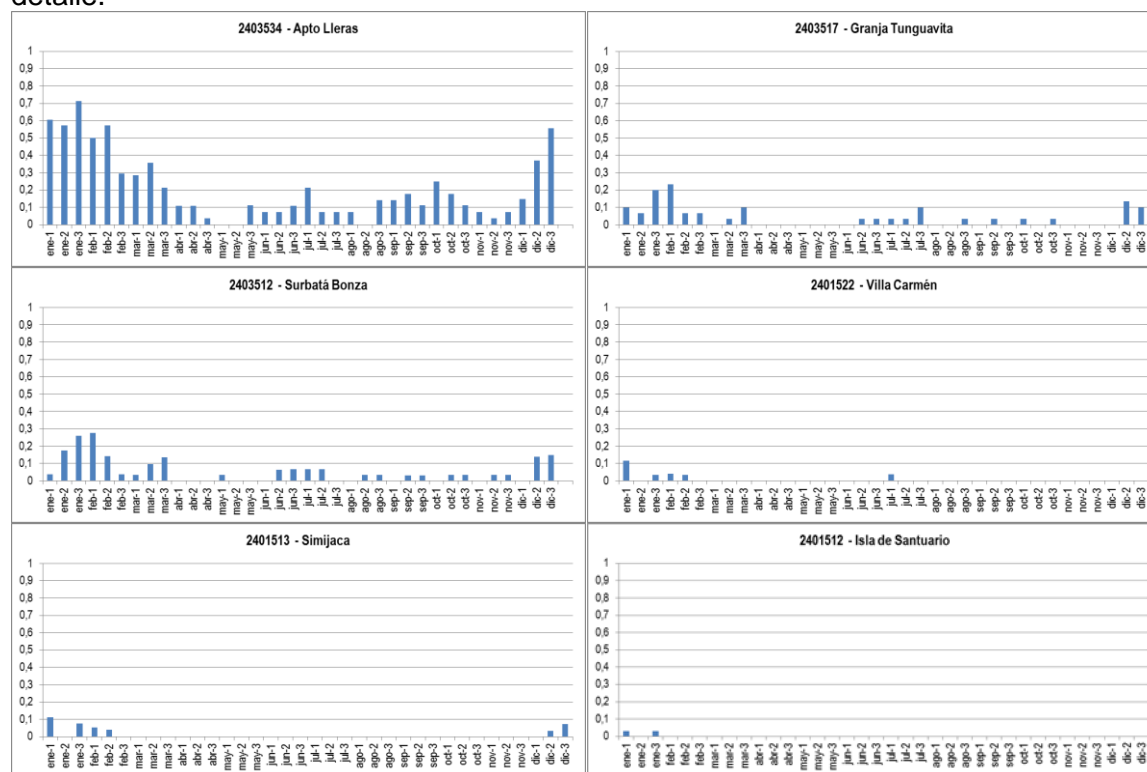




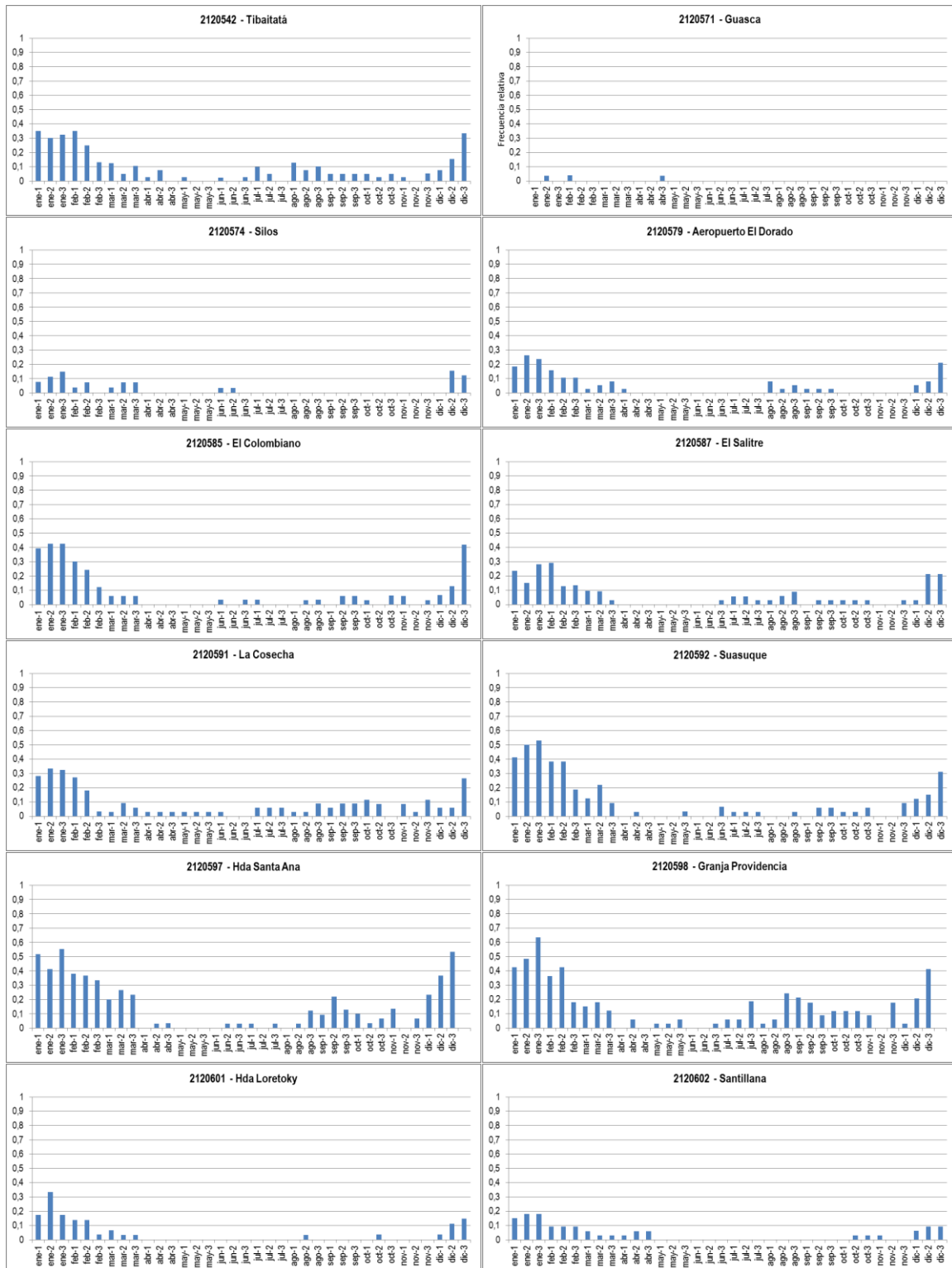


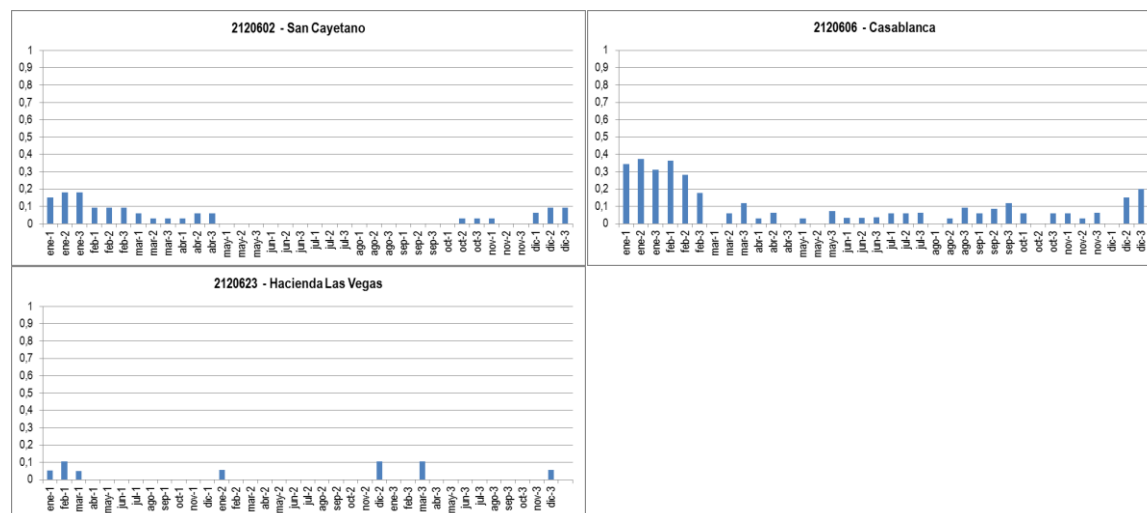
- Heladas entre ligeras y moderadas ( $-3^{\circ}\text{C}$  a  $0^{\circ}\text{C}$ )

**Figura G-3:** gráficos de frecuencia relativa de las heladas entre ligeras y moderadas en detalle.



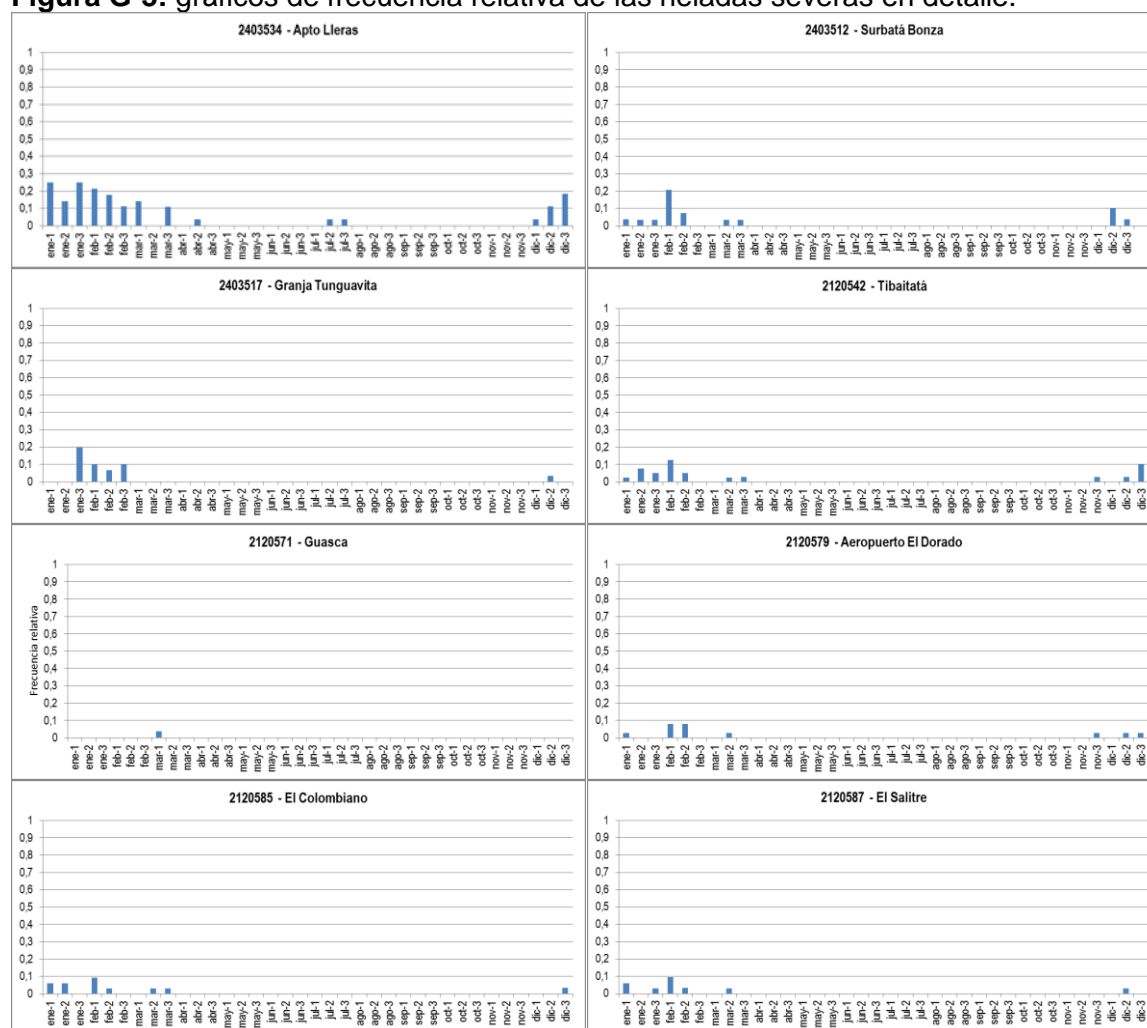


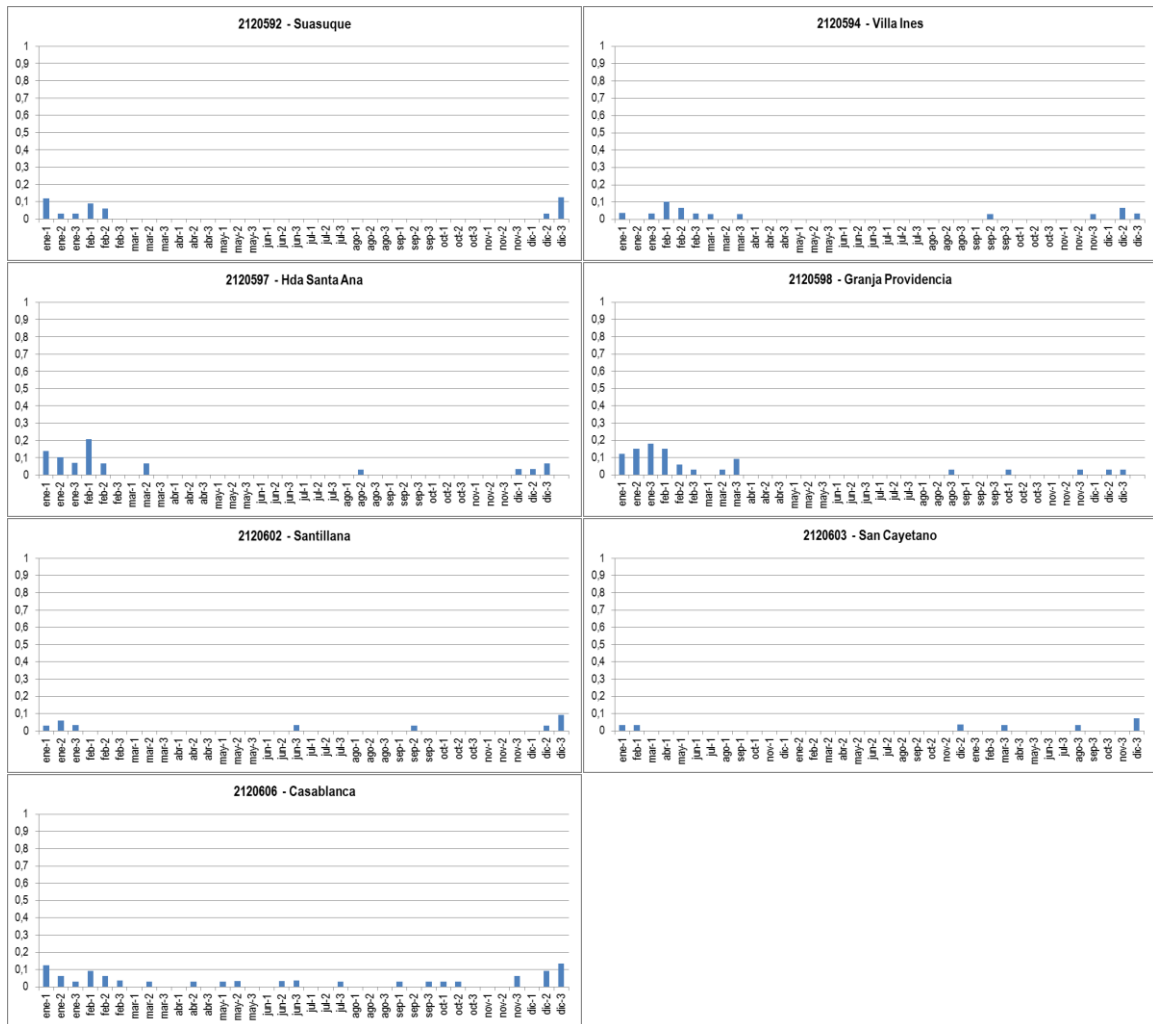




- Heladas severas (menores a  $-3^{\circ}\text{C}$ )

**Figura G-3:** gráficos de frecuencia relativa de las heladas severas en detalle.





## H. Anexo: Tabla de valores de retorno en °C de la intensidad de la temperatura mínima

CODIGO	ESTACION	LAT.	LONG.	ALT	MUNICIPIO	Enf.	Periodo de retorno							Probabilidad							N	D190	D195	D199	D<Dt	Sig	Med	Dest
							2	5	7	10	20	50	2	5	7	10	20	50										
2120542	Tibaitala	4,7	-74,2	2543	MOSQUERA	SI	-1,9	-3,5	-4,0	-4,5	-5,5	-6,8	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	40	0,19	0,21	0,25	0,11	Si	-2,23	1,76		
2120570	Guasca	4,9	-73,9	2750	GUASCA	SI	1,2	-0,1	-0,5	-1,0	-1,8	-2,9	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	33	0,21	0,23	0,28	0,17	Si	0,96	1,48		
2120571	Jardin Botánico	4,7	-74,1	2552	BOGOTA	SI	2,4	0,6	0,0	-0,6	-1,8	-3,3	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	32	0,21	0,23	0,28	0,12	Si	2,03	2,05		
2120572	Granja San Jorge	4,5	-74,2	2900	SOACHA	SI	2,5	1,2	0,7	0,3	-0,6	-1,6	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	31	0,21	0,24	0,29	0,10	Si	2,23	1,50		
2120574	Silos	5,1	-73,7	2709	CHOCONTA	SI	0,2	-1,5	-2,0	-2,5	-3,6	-4,9	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	31	0,21	0,24	0,29	0,13	Si	-0,12	1,86		
2120579	Apto El Dorado	4,7	-74,2	2547	BOGOTA	SI	-1,0	-2,9	-3,5	-4,1	-5,3	-6,9	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	39	0,19	0,21	0,26	0,08	Si	-1,33	2,14		
2120585	El Colombiano	5,0	-73,8	2567	SESQUILE	SI	-1,7	-3,3	-3,8	-4,4	-5,4	-6,8	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	33	0,21	0,23	0,28	0,09	Si	-1,96	1,87		
2120587	El Salitre	4,7	-74,3	2570	BOJACA	SI	-0,8	-2,4	-2,9	-3,5	-4,5	-5,8	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	35	0,20	0,22	0,27	0,06	Si	-1,13	1,80		
2120589	Guanata	4,9	-74,1	2550	CHIA	SI	0,1	-1,1	-1,5	-1,9	-2,7	-3,7	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	34	0,21	0,23	0,27	0,11	Si	-0,09	1,38		
2120591	La Cosecha	5,0	-74,0	2600	ZIPAQUIRA	SI	-1,3	-3,4	-4,1	-4,8	-6,1	-7,9	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	35	0,20	0,22	0,27	0,14	Si	-1,68	2,38		
2120592	Suasque	4,8	-74,0	2650	SOPO	SI	-2,2	-3,8	-4,3	-4,8	-5,8	-7,1	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	34	0,21	0,23	0,27	0,09	Si	-2,49	1,78		
2120594	Villa Ines	4,8	-74,4	2590	FACATATIVA	SI	-1,4	-3,1	-3,7	-4,3	-5,4	-6,8	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	33	0,21	0,23	0,28	0,07	Si	-1,74	1,95		
2120596	Tachi	4,9	-74,2	2650	SUBACHOQUE	SI	-1,2	-2,7	-3,1	-3,6	-4,5	-5,7	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	34	0,21	0,23	0,27	0,14	Si	-1,47	1,65		
2120597	Hacienda Santa Ana	5,1	-73,9	2572	NEMOCON	SI	-2,7	-4,4	-4,9	-5,5	-6,5	-7,9	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	33	0,21	0,23	0,28	0,07	Si	-3,03	1,88		
2120598	Granja Providencia	4,8	-74,2	2560	TENJO	SI	-2,9	-4,7	-5,3	-5,9	-7,1	-8,6	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	34	0,21	0,23	0,27	0,11	Si	-3,20	2,09		
2120601	Hacienda Lorelky	5,1	-73,8	2550	SUESCA	SI	-0,2	-1,5	-1,9	-2,3	-3,1	-4,1	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	30	0,22	0,24	0,29	0,06	Si	-0,45	1,39		

						Periodo de retorno							Probabilidad													
CODIGO	ESTACION	LAT.	LONG.	ALT	MUNICIPIO	Enf.	2	5	7	10	20	50	2	5	7	10	20	50	N	D190	D195	D199	D<Dt	Sig	Med	Dest
2120602	Santillana	4,9	-74,1	2575	TABIO	SI	0,1	-1,9	-2,5	-3,1	-4,4	-6,0	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	35	0,20	0,22	0,27	0,15	Si	-0,29	2,19
2120603	San Cayetano	4,9	-74,2	2650	SUBACHOQUE	SI	-0,7	-2,6	-3,2	-3,8	-5,0	-6,5	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	33	0,21	0,23	0,28	0,14	Si	-1,05	2,10
2120606	Casablanca	4,7	-74,3	2575	MADRID	SI	-1,5	-3,8	-4,5	-5,3	-6,7	-8,5	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	35	0,20	0,22	0,27	0,17	Si	-1,96	2,53
2306510	Sabaneta	4,9	-74,3	2475	SAN FRANCISCO	NO	5,3	3,2	2,6	1,9	0,6	-1,1	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	25	0,24	0,26	0,32	0,14	Si	4,92	2,33
2120623	Hacienda Las Vegas	4,7	-74,2	2543	BOGOTA DC	SI	0,8	-0,2	-0,5	-0,8	-1,5	-2,3	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	22	0,25	0,28	0,34	0,09	Si	0,64	1,14
2401512	Isla de Santuario	5,5	-73,7	2580	FUQUENE	SI	3,3	1,7	1,2	0,6	-0,4	-1,7	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	33	0,21	0,23	0,28	0,12	Si	3,03	1,83
2401522	Villa Carmen	5,5	-73,5	2600	SAMACA	SI	0,7	-0,7	-1,2	-1,7	-2,6	-3,7	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	33	0,21	0,23	0,28	0,09	Si	0,45	1,62
2401530	Villa de Leyva	5,7	-73,5	2215	VILLA DE LEYVA	NO	5,3	3,7	3,2	2,6	1,6	0,2	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	29	0,22	0,25	0,30	0,13	Si	5,04	1,85
2403513	UPTC	5,6	-73,4	2690	TUNJA	SI	2,0	0,5	0,0	-0,4	-1,4	-2,6	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	31	0,21	0,24	0,29	0,03	Si	1,73	1,67
2403525	Chita	6,2	-72,5	2888	CHITA	SI	1,5	0,5	0,2	-0,2	-0,8	-1,6	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	29	0,22	0,25	0,30	0,13	Si	1,32	1,13
2403531	Chiscas	6,5	-72,5	2350	CHISCAS	NO	7,0	4,9	4,3	3,6	2,3	0,6	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	32	0,21	0,23	0,28	0,13	Si	6,61	2,31
2403532	Sativanorte	6,1	-72,7	2594	SATIVANORTE	NO	6,2	4,5	4,0	3,4	2,3	1,0	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	29	0,22	0,25	0,30	0,18	Si	5,89	1,90
2403534	Aeropuerto Lleras	5,7	-73,0	2500	SOGAMOSO	SI	-3,8	-6,0	-6,7	-7,4	-8,8	-10,6	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	28	0,23	0,25	0,30	0,12	Si	-4,16	2,49
2401513	Simijaca	5,5	-73,9	2572	SIMIJACA	SI	1,4	-0,2	-0,7	-1,2	-2,2	-3,5	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	22	0,25	0,28	0,34	0,09	Si	1,11	1,78
2403512	Surbata Bonza	5,8	-73,1	2485	DUITAMA	SI	-1,6	-3,8	-4,5	-5,2	-6,5	-8,3	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	33	0,21	0,23	0,28	0,08	Si	-2,02	2,42
2403517	Granja Tunguavita	5,7	-73,1	2470	PAIPA	SI	-1,1	-3,2	-3,9	-4,6	-6,0	-7,7	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	30	0,22	0,24	0,29	0,10	Si	-1,49	2,40
2306507	Esc Vocacional	5,2	-74,2	1940	PACHO	NO	5,3	2,0	0,9	-0,2	-2,3	-5,0	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	38	0,19	0,22	0,26	0,14	Si	4,70	3,76
2401509	Inst Agro Santa Sofia	5,7	-73,6	2300	SANTA SOFIA	NO	6,8	5,2	4,7	4,2	3,2	1,9	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	25	0,24	0,26	0,32	0,13	Si	6,50	1,76

## I. Anexo: Tabla de probabilidad de la ocurrencia de heladas ante un ENOS

Estacion	Nombre		% Probabilidad												Sign. < 0.05
			Niño				Niña				Neutro				
			Elev	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	
2120542	Tibaitata	2543	46	0	0	0	-38	0	0	0	0	0	0	0	0,743
2120574	Silos	2709	63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,000
2120579	El Dorado	2547	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,000
2120585	El Colombiano	2567	64	0	0	0	0	0	0	0	-40	0	0	0	0,156
2120587	El Salitre	2570	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,000
2120591	La Cosecha	2600	58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,000
2120592	Suasuke	2650	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,000
2120594	Villalnes	2590	50	0	0	0	-57	0	0	0	0	0	0	0	1,000
2120596	Tachi	2650	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,504
2120597	StaAnaHda	2572	45	0	0	0	-43	0	0	0	0	0	0	0	1,000
2120598	Granja Providencia	2560	0	0	0	0	-57	0	0	0	0	0	0	53	0,288
2120602	Santillana	2575	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,000
2120603	San Cayetano	2650	0	0	0	0	0	0	0	0	-40	0	0	0	1,000
2120606	Casablanca	2575	58	0	0	64	0	0	0	0	-43	0	0	0	1,000
2401512	Isla de Santuario	2580	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,000
2401522	Villa Carmen	2600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,000
2403512	Surbata Bonza	2485	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,000
2403513	UPTC	2690	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,000
2403517	Granja Tinguavita	2470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,000
2403534	Aeropuerto Lleras	2500	70	0	0	56	0	0	0	0	0	-40	0	0	<b>0,021</b>



## **J. Anexo: Sistema de producción lechero**

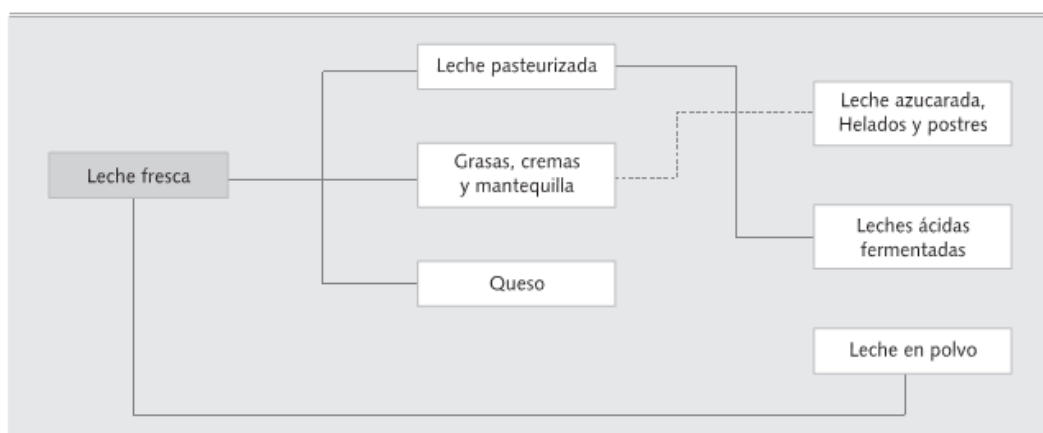
- **Generalidades del sistema de producción**

El sistema de producción lechero es una cadena de producción soportada bajo la interacción de ganaderos, centros de acopio, cooperativas y empresas procesadoras (Agrocadenas, 2005). El sistema se soporta principalmente sobre hatos lecheros alimentados a través de pastos, lo cual debido a la variabilidad climática imperante en el trópico y en el mundo entero induce a fluctuaciones de calidad y cantidad (Corpoica, 2005).

En los sistemas de producción lecheros de países desarrollados, como Estados Unidos, Canadá, Europa entre otros, que fundamenta la alimentación en pastos ensilados, sistemas estabulados y suplementos nutricionales, se ven afectados por los costos de estos alimentos e insumos más no de factores climáticos (Corpoica, 2005).

La cadena láctea se compone de la producción de leche fresca por parte de sistemas estabulados o al pastoreo, la producción agroindustrial de sus derivados como lo son la leche pasteurizada, quesos, grasas, cremas, mantequillas, leches azucaradas, helados entre otros y la comercialización a nivel local, nacional y global (fig. K-1).

A nivel mundial, Europa se posiciona como el primer productor de leche alcanzando los 207 millones de toneladas métricas (TM) equivalente al 43% de la producción. Asia y Norteamérica con 19 y 17% de la producción respectivamente (90 y 83 millones de TM). América Latina y el Caribe ocupa el cuarto lugar con 60 millones de TM (12%) seguido por Oceanía y África con 5% y 4 % (23 y 19 millones de TM) respectivamente (Corpoica, 2005).

**Figura J-1:** Generalidades de la cadena láctea (Tomado de: DNP 2003)

Según cifras de la FAO, citado por Corpoica (2005), en el mundo existen un total de 232 millones de bovinos sólo dedicados a la producción lechera. El mayor número de vacas se encuentra localizado en el continente asiático con 74 millones de cabezas equivalente al 32% del total mundial. Europa y América Latina y el Caribe se encuentran localizados en el segundo lugar con 52 millones de cabezas. África con 38 millones, Norteamérica con 10 millones y Oceanía con 6 millones de cabezas se ubican en el cuarto, quinto y sexto lugar.

**Tabla J-1:** cifras sobre el sistema de producción lechera en el mundo.

Cadena láctea en el mundo			
Continente	Producción (Millones de TM)	Rendimiento Kg/Vaca	N° de Bovinos
Asia	90	1210	74
África	19	490	38
Norteamérica	83	8092	10
América Latina y Caribe	60	1164	52
Europa	207	3965	52
Oceanía	23	4213	6
<b>Total</b>	<b>482</b>	<b>19134</b>	<b>232</b>

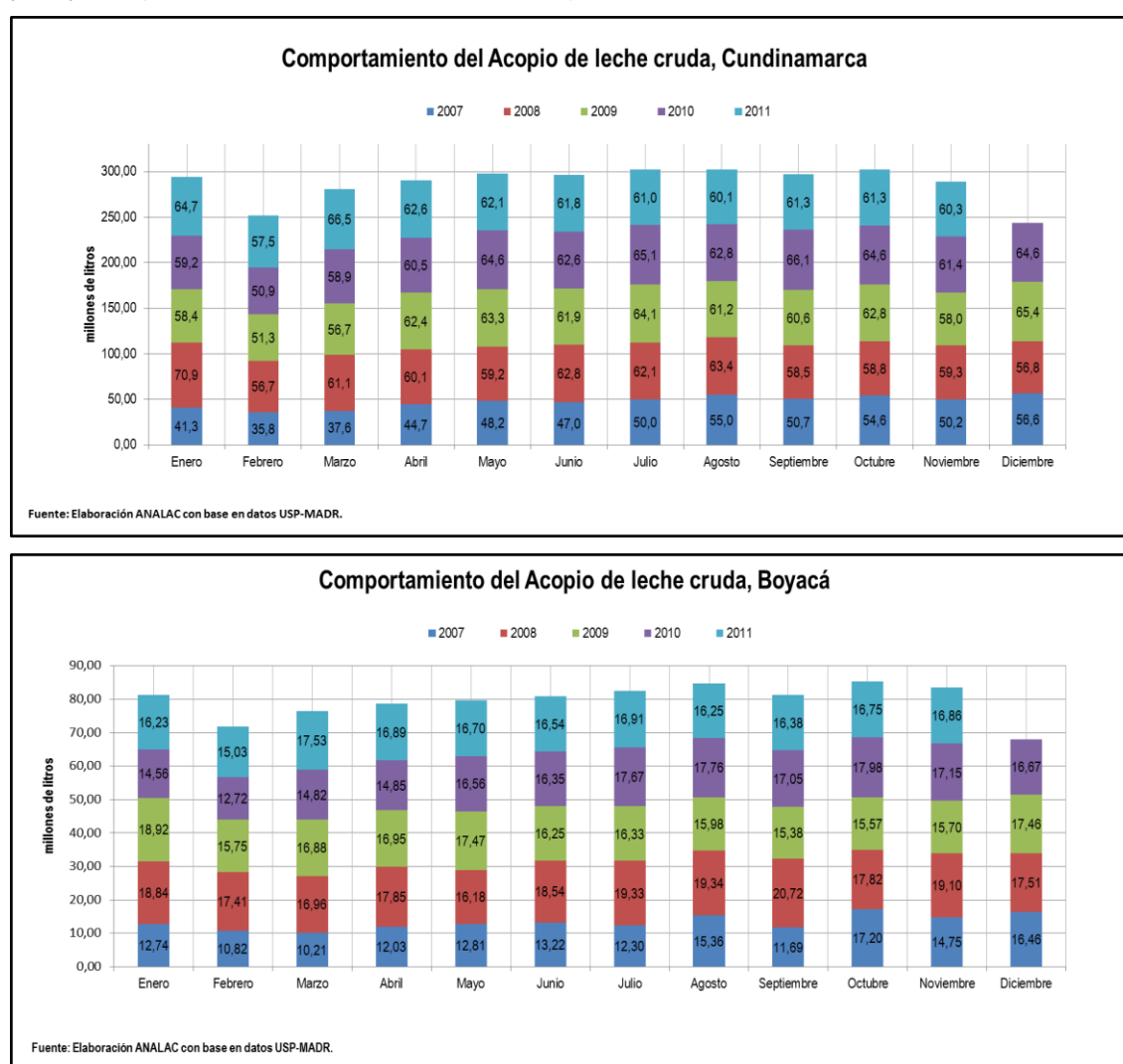
A pesar que Norteamérica se ubica en el quinto lugar por número de cabezas de ganado lechero, presenta el mejor rendimiento con 8092 Kg/vaca, seguido por Oceanía con 4.213 Kg/vaca y Europa con 3.965 Kg/vaca. Asia, América Latina y África presentan rendimientos aproximados a 1210 kg/vaca, 1164 kg/vaca y 490 kg/vaca respectivamente.



- **Generalidades sobre sistemas de producción lechera en Colombia y en el Altiplano Cundiboyacense**

Inicialmente en Colombia el sistema de producción lechero estuvo estrechamente ligado a las regiones de clima frío, cuyas razas bovinas importadas principalmente desde Europa tuvieron mejores condiciones de adaptabilidad a estos climas. Los ejes de desarrollo de la ganadería de leche se concentró en la región del Oriente Antioqueño, Altiplano Cundiboyacense y Nariño (Agrocadenas, 2005).

**Figura J-2:** Comportamiento del acopio de leche en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá (Tomado de: Analac-MADR 2012)



Aunque Colombia ha presentado una tasa de crecimiento sostenida de la producción, el país ocupa el lugar N° 22 en producción de leche entera fresca de vaca con un total de 6,1 millones de toneladas muy lejos de Estados Unidos, el cual es el principal productor mundial de leche con 77,5 millones de toneladas; para América Latina, Brasil es el principal productor (sexto en el mundo) con 23,3 millones de toneladas. En general al ser la leche fresca un producto perecedero la comercialización se restringe principalmente a la demanda interna y a los flujos de intercambio binacional principalmente con países fronterizos, dejando como producto de exportación la leche en polvo (Agrocadenas, 2005).

Con respecto al rendimiento de leche por vaca en el país éste llega aproximadamente a los 1046 litros/vaca/año (se asume como periodo de lactancia) comparados con los más de 8000 litros/vaca/año producidos por países como Estados Unidos, Israel, Corea del Sur entre otros (Agrocadenas, 2005). Según cifras de Analac-MADR (2012), para el departamento de Cundinamarca se acopian en promedio 60 millones de litros de leche cruda, mientras para el departamento de Boyacá se ubica en 16 millones (figura K-2).

A nivel local, el valle de Ubaté y Chiquinquirá, donde la pradera predominante es el kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), se observan rendimientos entre 13 y 15 litros/vaca/día, variando ésta cifra, dependiendo del grado de tecnificación, área y número de animales en el hato (Corpoica, 2005).